

João Gil Josué

Projecto e Construção de um Sistema de Monitorização  
de Energia Eléctrica para uma Habitação

Lisboa  
2010



Universidade Nova de Lisboa  
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Secção de Electrotecnia e Máquinas Eléctricas

# Projecto e Construção de um Sistema de Monitorização de Energia Eléctrica para uma Habitação

Por:  
João Gil Josué

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Mário Ventim Neves (FCT-UNL)

Co-Orientador: Engenheiro João Murta Pina (FCT-UNL)

Lisboa  
2010



## Resumo

A gestão dos recursos energéticos é considerada um dos principais desafios que a sociedade moderna enfrenta. A participação activa dos consumidores na gestão dos seus consumos é essencial para a diminuição dos impactes ambientais resultantes da produção de energia. A monitorização dos consumos de energia eléctrica representa um importante vector no processo de redução dos consumos globais e das emissões de CO<sub>2</sub>.

O recente crescimento tecnológico na área da electrónica possibilita a implementação de soluções que potenciam uma redução dos consumos de electricidade. Os dispositivos electrónicos que realizam a monitorização de energia eléctrica são ferramentas fundamentais no aconselhamento dos consumidores.

Esta dissertação descreve o projecto, a construção e o teste de um sistema de monitorização de energia eléctrica para uma habitação. O sistema processa a informação em tempo real, utiliza comunicação sem fios e mostra os dados num visor LCD e no computador.

### Palavras-Chave:

Monitorização de energia eléctrica, gestão de energia, optimização de energia, domótica.



# Abstract

The energy resource management is a major concern worldwide. Energy management activities, such as demand-side load management, minimize environmental impacts of the energy production. Electric energy consumption monitoring has been proposed as an important process which makes immediate reductions in energy use and CO<sub>2</sub> emissions.

In recent years, advances in electronics have allowed the implementation of many technological solutions that could help to reduce energy consumption. The availability of an electronic system that monitors electric energy consumption can aid consumers to a better use of the energy.

This dissertation describes the design, prototyping and testing of a home electric energy monitoring system that provides residential consumers with real-time information about their electricity use. The system provides wireless communication and displays the information on a small LCD panel and on a computer.

## Keywords:

Electric energy monitoring, energy management, energy optimization, home automation.





# Agradecimentos

Agradeço a todos os professores, amigos e colegas que contribuíram para a minha formação ao longo dos últimos anos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Mário Ventim Neves, o reconhecimento pelos ensinamentos dados ao longo do curso e a oportunidade e o incentivo concedidos para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador, Engenheiro João Murta Pina, pelo apoio e sugestões que me facultou no decorrer da dissertação.

Aos meus colegas e amigos da secção de electrotecnia e máquinas eléctricas pela amizade, convívio e colaboração, demonstrados ao longo do curso.

Agradeço à minha amiga Muriel pelo dedicado trabalho de revisão deste documento.

Um agradecimento muito especial ao Centro de Formação Profissional da Indústria Electrónica (CINEL) na pessoa do Director, Engenheiro Eduardo Fonseca, pela colaboração e disponibilização dos laboratórios, bem como pelo fornecimento de diversos componentes electrónicos.

Agradeço ao meu irmão os conselhos e o apoio prestado na elaboração das placas de circuito impressos utilizadas neste trabalho.

Finalmente gostaria de agradecer à minha família, pai, mãe, irmão e avós pelo apoio e carinho que sempre me deram.



## Acrónimos

|                  |  |
|------------------|--|
| AC               | <i>Alternating Current</i>                         |
| ADC              | <i>Analog-to-Digital Converter</i>                 |
| API              | <i>Application Programming Interface</i>           |
| CE               | Comissão Europeia                                  |
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de Carbono                                 |
| CPU              | <i>Central Processing Unit</i>                     |
| DC               | <i>Direct Current</i>                              |
| GEE              | Gases de Efeito de Estufa                          |
| HID              | <i>Human Interface Device</i>                      |
| I <sup>2</sup> C | <i>Inter-Integrated Circuit</i>                    |
| ISR              | <i>Interrupt Service Routine</i>                   |
| LCD              | <i>Liquid Crystal Display</i>                      |
| LED              | <i>Light-Emitting Diode</i>                        |
| PC               | <i>Personal Computer</i>                           |
| PCB              | <i>Printed Circuit Board</i>                       |
| PGA              | <i>Programmable Gain Amplifier</i>                 |
| PIB              | Produto Interno Bruto                              |
| PIC              | <i>Programmable Interface Controller</i>           |
| PIC18            | <i>Programmable Interface Controller 18 serie</i>  |
| RF               | <i>Radio Frequency</i>                             |
| RISC             | <i>Reduced Instruction Set Computer</i>            |
| RTC              | <i>Real-Time Clock</i>                             |
| SIE              | <i>Serial Interface Engine</i>                     |
| SMT              | <i>Surface-Mount Technology</i>                    |
| SPI              | <i>Serial Peripheral Interface</i>                 |
| UART             | <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> |
| UE               | União Europeia                                     |
| URE              | Utilização Racional de Energia                     |
| USB              | <i>Universal Serial Bus</i>                        |



## Simbologia

|                      |  |
|----------------------|--|
| $E_{\text{acum}}$    | Energia acumulada  |
| $E_{\text{horaria}}$ | Média da energia consumida por hora                        |
| $f_{\text{corte}}$   | Frequência de corte do filtro capacitivo                   |
| $f_{\text{osc}}$     | Frequência de oscilação do microcontrolador                |
| $I_{\text{C}}$       | Corrente máxima consumida                                  |
| $I_{\text{f}}$       | Corrente de condução máxima do díodo                       |
| $I_{\text{max}}$     | Corrente alternada máxima                                  |
| $I_{\text{p}}$       | Corrente do primário do transformador                      |
| $I_{\text{rms}}$     | Valor eficaz da corrente                                   |
| $P_{\text{activa}}$  | Potência activa  |
| PF                   | Factor de potência (do inglês, <i>power factor</i> )       |
| $R_{\text{b}}$       | Resistência de <i>burden</i>                               |
| $T_{\text{rmax}}$    | Temperatura máxima de funcionamento do regulador de tensão |
| $t_{\text{min}}$     | Tempo de medição de dados em minutos                       |
| TMR                  | Registo do temporizador do microcontrolador                |
| $T_{\text{out}}$     | Período da interrupção do temporizador do microcontrolador |
| $U_{\text{d}}$       | Tensão limiar de condução do díodo                         |
| $U_{\text{o}}$       | Valor médio de $U_{\text{ret}}$                            |
| $U_{\text{ret}}$     | Tensão rectificada   |
| $U_{\text{rip}}$     | Tensão de <i>ripple</i> (pico a pico)                      |
| $U_{\text{sec}}$     | Tensão de pico do secundário do transformador              |
| $V_{\text{rms}}$     | Valor eficaz da tensão                                     |
| $V_{\text{rrm}}$     | Tensão inversa máxima do díodo                             |
| $Z_{\text{i}}$       | Impedância de entrada                                      |
| $R_{\text{tJA}}$     | Resistência térmica da junção para o ambiente              |



# Índice de Matérias

|   |      |
|---|------|
| Resumo.....   | III  |
| Abstract .....  | V    |
| Agradecimentos.....   | VII  |
| Acrónimos.....  | IX   |
| Simbologia .....  | XI   |
| Índice de Matérias .....  | XIII |
| Índice de Figuras .....   | XVII |
| Índice de Tabelas.....  | XXI  |
| Capítulo 1    Introdução.....   | 1    |
| 1.1    Enquadramento e Motivação.....   | 1    |
| 1.2    Objectivos .....   | 2    |
| 1.3    Organização da Dissertação .....   | 3    |
| Capítulo 2    Fundamentos Teóricos .....  | 5    |
| 2.1    Eficiência Energética no Sector Doméstico .....                              | 5    |
| 2.2    A Importância da Monitorização de Electricidade.....                         | 6    |
| 2.2.1    Estudos realizados .....   | 7    |
| 2.2.2    Vantagens .....  | 7    |
| 2.3    Sistemas de Monitorização de Energia Eléctrica .....                         | 8    |
| 2.3.1    Constituição e funcionamento.....  | 9    |
| 2.3.2    Exemplos de sistemas comercializados ( <i>home energy monitors</i> ) ..... | 10   |
| 2.3.2.1    Monitorização ao nível do equipamento eléctrico.....                     | 10   |
| 2.3.2.2    Monitorização ao nível do contador electromecânico.....                  | 14   |
| 2.3.2.3    Monitorização ao nível do quadro eléctrico .....                         | 15   |
| 2.3.3    O futuro dos sistemas de monitorização.....                                | 19   |
| Capítulo 3    Projecto do Sistema de Monitorização.....                             | 21   |
| 3.1    Descrição do Sistema .....   | 21   |
| 3.2    Estrutura Geral .....  | 22   |
| 3.2.1    Dispositivo de aquisição de dados.....                                     | 23   |
| 3.2.2    Dispositivo de visualização de dados.....                                  | 23   |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 3.3        | Hardware .....                                 | 24 |
| 3.3.1      | Medidor de potência .....                      | 25 |
| 3.3.2      | Transceptor sem fios .....                     | 27 |
| 3.3.3      | Módulo LCD .....                               | 28 |
| 3.3.4      | Microcontroladores .....                       | 30 |
| 3.3.4.1    | Dispositivo de aquisição de dados .....        | 31 |
| 3.3.4.2    | Dispositivo de visualização de dados .....     | 33 |
| 3.3.5      | Sensor de corrente .....                       | 35 |
| 3.3.6      | Fonte de alimentação .....                     | 36 |
| 3.3.6.1    | Dispositivo de aquisição de dados .....        | 36 |
| 3.3.6.2    | Dispositivo de visualização de dados .....     | 40 |
| 3.3.7      | Condicionamento de sinal .....                 | 42 |
| 3.3.8      | Protecções .....                               | 44 |
| 3.3.9      | Comunicação .....                              | 45 |
| 3.3.9.1    | SPI (PIC18F2420 ↔ CS5463) .....                | 45 |
| 3.3.9.2    | UART (PIC ↔ ER400TRS) .....                    | 47 |
| 3.3.9.3    | USB (PIC18F2550 ↔ PC) .....                    | 49 |
| 3.4        | Firmware .....                                 | 51 |
| 3.4.1      | PIC18F2420 .....                               | 52 |
| 3.4.1.1    | ISR do receptor da interface UART .....        | 53 |
| 3.4.1.2    | ISR do Timer 1 .....                           | 54 |
| 3.4.1.3    | Cálculo da energia consumida .....             | 55 |
| 3.4.1.4    | Processo de conversão dos dados .....          | 57 |
| 3.4.1.5    | Rotina de calibração do CS5463 .....           | 58 |
| 3.4.2      | PIC18F2550 .....                               | 59 |
| 3.4.2.1    | ISR do receptor da interface UART .....        | 60 |
| 3.4.2.2    | ISR do Timer 0 .....                           | 61 |
| 3.4.2.3    | ISR do Timer 1 .....                           | 62 |
| 3.4.2.4    | ISRs do porto B e do Timer 2 .....             | 63 |
| 3.4.2.5    | Rotinas da interface USB .....                 | 65 |
| 3.5        | Software .....                                 | 66 |
| 3.6        | Interface do Dispositivo de Visualização ..... | 68 |
| Capítulo 4 | Construção do Protótipo .....                  | 71 |
| 4.1        | Produção das PCBs .....                        | 71 |
| 4.2        | Soldadura dos Componentes .....                | 72 |
| 4.3        | Instalação em Caixas .....                     | 73 |
| 4.4        | Módulos de Leitura de Sinais .....             | 75 |



|            |  |    |
|------------|--|----|
| 4.5        | Especificações .....                         | 76 |
| Capítulo 5 | Resultados Experimentais .....               | 77 |
| 5.1        | Calibração .....                             | 77 |
| 5.1.1      | Offset dos canais de entrada do CS5463 ..... | 77 |
| 5.1.2      | Deslocação de fase .....                     | 78 |
| 5.1.3      | Factores de conversão .....                  | 79 |
| 5.2        | Erros de Medição .....                       | 79 |
| 5.2.1      | Valor eficaz da tensão .....                 | 79 |
| 5.2.2      | Valor eficaz da corrente .....               | 80 |
| 5.2.3      | Potência activa.....                         | 81 |
| 5.3        | Testes de Funcionamento .....                | 81 |
| 5.4        | Análise Sumária de Dados .....               | 86 |
| Capítulo 6 | Conclusões .....                             | 89 |
|            | Bibliografia .....                           | 91 |
|            | Apêndice I: Lista de Material .....          | 93 |
|            | Apêndice II: Circuitos Eléctricos .....      | 95 |
|            | Apêndice III: Layouts PCB .....              | 97 |



# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Diagrama de blocos geral de um sistema de monitorização de energia eléctrica ..... | 9  |
| Figura 2.2 Kill A Watt GT P4480 .....   | 11 |
| Figura 2.3 Plogg e Plogg Manager .....  | 11 |
| Figura 2.4 Power-Mate.....  | 12 |
| Figura 2.5 EnergyHub .....  | 12 |
| Figura 2.6 PowerCost Monitor 28000.....   | 14 |
| Figura 2.7 PowerMonitor EM100B .....  | 14 |
| Figura 2.8 Wattson .....  | 16 |
| Figura 2.9 Elite.....   | 17 |
| Figura 2.10 TED 5000.....   | 17 |
| Figura 2.11 CW120.....  | 18 |
| Figura 2.12 Projecto EnergyMate .....   | 19 |
| Figura 3.1 Dispositivos do sistema de monitorização desenvolvido.....                         | 21 |
| Figura 3.2 Diagrama de blocos geral do sistema de monitorização .....                         | 22 |
| Figura 3.3 Diagrama de blocos do dispositivo de aquisição de dados .....                      | 23 |
| Figura 3.4 Diagrama de blocos do dispositivo de visualização de dados .....                   | 24 |
| Figura 3.5 Medidor de potência CS5463 .....   | 25 |
| Figura 3.6 Diagrama de blocos do CS5463.....  | 25 |
| Figura 3.7 Diagrama de ligações do CS5463 .....   | 27 |
| Figura 3.8 Transceptor sem fios ER400TRS.....   | 27 |
| Figura 3.9 Diagrama de blocos do ER400TRS .....   | 28 |
| Figura 3.10 Módulo LCD Batron BTHQ 42003AV-06.....  | 29 |
| Figura 3.11 Diagrama de blocos do módulo LCD .....  | 29 |
| Figura 3.12 Diagrama de blocos de um microcontrolador PIC18 de 8 bits .....                   | 30 |
| Figura 3.13 Diagrama de ligações do PIC18F2420 .....  | 32 |
| Figura 3.14 Diagrama de ligações do PIC18F2550 .....  | 34 |
| Figura 3.15 Sensor de corrente CR3110 .....   | 35 |
| Figura 3.16 Circuito eléctrico do sensor de corrente.....                                     | 35 |
| Figura 3.17 Gráfico $U_{out}(I_p)$ para diferentes valores de $R_b$ .....                     | 36 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.18 Circuito eléctrico da fonte de alimentação do dispositivo de aquisição de dados.....  | 37 |
| Figura 3.19 Transformador de potência Myrra 230 V - 2 VA.....   | 38 |
| Figura 3.20 a) Formas de onda das tensões aplicadas ao circuito rectificador ( $U_{S1}$ e $U_{S2}$ ) b) Formas de onda da tensão depois do circuito rectificador sem e com filtro ..... | 39 |
| Figura 3.21 Regulador de tensão LM78L05ACZ.....   | 40 |
| Figura 3.22 Circuito eléctrico da fonte de alimentação do dispositivo de visualização de dados .....  | 41 |
| Figura 3.23 Condicionamento do sinal de corrente .....  | 42 |
| Figura 3.24 Condicionamento do sinal de tensão.....   | 43 |
| Figura 3.25 Circuito eléctrico das protecções do dispositivo de aquisição de dados .....  | 44 |
| Figura 3.26 Protecções do dispositivo de aquisição de dados .....   | 45 |
| Figura 3.27 Ligação SPI entre o CS5463 e o PIC18F2420 .....   | 45 |
| Figura 3.28 Sequência de escrita e de leitura dos comandos e dados do CS5463 .....  | 46 |
| Figura 3.29 Ligações utilizadas na comunicação UART entre os PICs e os ER400TRS .....   | 47 |
| Figura 3.30 Sequência de envio de dados entre o PIC18F2420 e o PIC18F2550 .....   | 48 |
| Figura 3.31 Formato da mensagem utilizada na comunicação entre os PICs.....   | 48 |
| Figura 3.32 Ligação USB entre o PIC18F2550 e o socket USB .....   | 50 |
| Figura 3.33 Formato de mensagem utilizada na comunicação entre o dispositivo de visualização de dados e o computador .....  | 50 |
| Figura 3.34 Fluxograma da rotina principal dos microcontroladores.....  | 51 |
| Figura 3.35 Fluxograma da ISR do receptor da interface UART do PIC18F2420 .....   | 53 |
| Figura 3.36 Fluxograma da ISR do Timer 1 do PIC18F2420 .....  | 55 |
| Figura 3.37 Fluxograma da rotina utilizada no cálculo da média da energia consumida por hora.....   | 56 |
| Figura 3.38 Fluxograma da rotina de calibração do CS5463 .....  | 58 |
| Figura 3.39 Fluxograma da ISR do receptor da interface UART do PIC18F2550 .....   | 60 |
| Figura 3.40 Fluxograma da ISR do Timer 0 do PIC18F2550 .....  | 62 |
| Figura 3.41 Fluxograma da ISR do Timer 1 do PIC18F2550 .....  | 63 |
| Figura 3.42 a) Fluxograma da ISR do porto B b) Fluxograma da ISR do Timer 2 do PIC18F2550.....  | 64 |
| Figura 3.43 Rotina de envio/recepção de dados através da interface USB .....  | 65 |
| Figura 3.44 Interface gráfica do programa desenvolvido para o computador .....  | 66 |
| Figura 3.45 Formato dos dados guardados no ficheiro txt .....   | 67 |
| Figura 3.46 Janela de visualização dos gráficos diários de consumo .....  | 68 |
| Figura 3.47 Descrição dos botões do dispositivo de visualização de dados.....   | 68 |
| Figura 3.48 Principais painéis de visualização do visor LCD .....   | 69 |
| Figura 4.1 <i>Bottom layers</i> das PCBs dos dispositivos .....   | 72 |
| Figura 4.2 Componentes soldados na PCB do dispositivo de aquisição de dados .....   | 72 |
| Figura 4.3 Componentes soldados na PCB do dispositivo de visualização de dados.....   | 73 |
| Figura 4.4 Imagem do interior do dispositivo de aquisição de dados.....   | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.5 Imagem do interior do dispositivo de visualização de dados.....                                    | 74 |
| Figura 4.6 Pinças de crocodilo utilizadas na leitura da tensão no quadro eléctrico .....                      | 75 |
| Figura 4.7 Módulo utilizado na monitorização ao nível do equipamento eléctrico .....                          | 75 |
| Figura 5.1 Leitura da deslocação de fase introduzida pelo sensor de corrente CR3110 .....                     | 78 |
| Figura 5.2 Ligação do dispositivo de aquisição de dados ao quadro eléctrico.....                              | 82 |
| Figura 5.3 Gráfico de $P_{\text{activa}}$ consumida durante o teste ao circuito de tomadas / iluminação ..... | 83 |
| Figura 5.4 Gráfico de $E_{\text{acum}}$ consumida durante o teste ao circuito de tomadas / iluminação .....   | 84 |
| Figura 5.5 Gráfico de $P_{\text{activa}}$ consumida ao nível do circuito geral .....                          | 85 |
| Figura 5.6 Gráfico de $E_{\text{acum}}$ consumida ao nível do circuito geral .....                            | 85 |
| Figura 5.7 Imagem do visor LCD no final do teste ao circuito geral .....                                      | 87 |



## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 Comparação de sistemas de monitorização ao nível do equipamento eléctrico.....         | 13 |
| Tabela 2.2 Comparação de sistemas de monitorização ao nível do contador electromecânico .....     | 15 |
| Tabela 2.3 Comparação de sistemas de monitorização ao nível do quadro eléctrico .....             | 19 |
| Tabela 3.1 Correntes máximas consumidas no dispositivo de aquisição de dados.....                 | 37 |
| Tabela 3.2 Correntes máximas consumidas no dispositivo de visualização de dados .....             | 41 |
| Tabela 3.3 Descrição dos elementos da mensagem utilizada na comunicação entre os PICs.....        | 49 |
| Tabela 3.4 Tipos de mensagem utilizada na comunicação entre os PICs .....                         | 49 |
| Tabela 3.5 Interrupções utilizadas pelo PIC18F2420 .....  | 52 |
| Tabela 3.6 Estados de acção do PIC18F2420 .....   | 53 |
| Tabela 3.7 Variáveis auxiliares utilizadas no cálculo da média da energia consumida por hora..... | 56 |
| Tabela 3.8 Factores de conversão dos dados medidos pelo CS5463 .....                              | 57 |
| Tabela 3.9 Endereços de memória EEPROM utilizados pelo PIC18F2420 .....                           | 59 |
| Tabela 3.10 Interrupções utilizadas pelo PIC18F2550 .....   | 59 |
| Tabela 3.11 Estados de acção do PIC18F2550 .....  | 60 |
| Tabela 4.1 Especificações do sistema de monitorização desenvolvido .....                          | 76 |
| Tabela 5.1 Medição de dados antes e depois da calibração do CS5463 ( $V_{IN} = I_{IN} = 0$ )..... | 77 |
| Tabela 5.2 Avaliação do erro de medição do valor eficaz da tensão .....                           | 79 |
| Tabela 5.3 Avaliação do erro de medição do valor eficaz da corrente.....                          | 80 |
| Tabela 5.4 Avaliação do erro de medição da potência activa ( $PF = 1$ ) .....                     | 81 |
| Tabela 5.5 Medição dos consumos ao nível do equipamento eléctrico .....                           | 82 |
| Tabela 5.6 Descrição do teste realizado ao nível do circuito de tomadas / iluminação .....        | 83 |
| Tabela 5.7 Valores médios dos dados de energia em cada situação .....                             | 84 |





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento e Motivação

A electricidade tem um papel importante no desenvolvimento económico e social do mundo e na qualidade de vida dos seus cidadãos e consumidores (CE, 2008a). A sua procura representa a parte da energia final que regista a expansão mais rápida (IEA, 2009).

Contudo, a produção de energia eléctrica tem origem sobretudo em combustíveis fósseis, como o petróleo, o gás natural e o carvão. A natureza finita destes recursos naturais e a consequente libertação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e de outros gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa (GEE) alertaram o mundo para a insustentabilidade da actual situação. Caso não exista um controlo imediato da emissão destes gases poluentes as alterações climáticas resultantes trarão consequências catastróficas (IPCC, 2007).

Além do impacte ambiental inerente ao consumo dos combustíveis fósseis existe igualmente uma grande preocupação económica. Segundo a Comissão Europeia (CE) os custos das alterações climáticas podem ser devastadores para a economia mundial, citando como prova, os dados do Relatório Stern divulgado no fim de 2006 e que foi o primeiro a traduzir em valores económicos os efeitos das alterações climáticas. Segundo este relatório, se não forem tomadas medidas em relação aos consumos mundiais de combustíveis fósseis haverá uma perda do PIB mundial entre 5 e 20 % (Stern, 2006).

Atendendo a todos os problemas que o consumo dos recursos fósseis acarreta, a maioria dos países tem começado a tomar importantes medidas de modo a reduzir os seus consumos de energia primária. Os investimentos nas energias renováveis e na eficiência energética têm sido as principais medidas no caminho da sustentabilidade energética, uma vez que são economicamente benéficas, aumentam a segurança no abastecimento e reduzem as emissões de gases poluentes (IPCC, 2007).

O sector doméstico foi responsável, em 2007, por aproximadamente 28 % do consumo de electricidade na União Europeia (UE) e, por isso, a aposta na eficiência energética neste sector contribui significativamente para uma redução dos consumos de energia eléctrica a nível mundial

(JRC, 2009). A forma como a energia eléctrica é utilizada constitui a principal chave do processo de mudança estando, inclusive, a tornar-se um aspecto cada vez mais importante nas nossas vidas. A participação activa dos consumidores na gestão dos seus consumos representa uma importante medida para a diminuição dos impactes ambientais resultantes da produção de energia eléctrica. A monitorização dos consumos de electricidade realizados em cada habitação é essencial no processo de gestão de energia, uma vez que o conhecimento detalhado da forma como a energia eléctrica é consumida e os respectivos custos servem de motivação para a mudança de comportamentos (Darby, 2006).

Hoje em dia, as empresas distribuidoras de energia eléctrica utilizam maioritariamente o tradicional contador electromecânico para medirem os consumos de electricidade de uma habitação. Com este tipo de aparelho apenas é possível medir o consumo eléctrico total sendo a informação disponibilizada de difícil leitura para o consumidor. Acresce ainda o facto de não ser facilmente perceptível o padrão do consumo eléctrico e, consequentemente, das medidas necessárias para a melhoria da eficiência energética da habitação.

O importante crescimento tecnológico ocorrido nos últimos anos na área da electrónica levou ao desenvolvimento de diversas tecnologias que potenciam uma redução do consumo de energia eléctrica no sector doméstico. O aparecimento de sistemas capazes de monitorizar e guardar os registos históricos dos consumos de energia eléctrica, em tempo real, representa uma importante solução de optimização. O recurso a este tipo de sistemas possibilita ao consumidor uma gestão mais eficiente dos consumos individuais de electricidade e, consequentemente, um aumento substancial da eficiência energética no sector doméstico. Os sistemas de monitorização são assim de grande relevância, tanto para a sociedade como para o ambiente, na medida em que possibilitam uma redução dos consumos de energia eléctrica e minimizam os problemas subjacentes à produção de electricidade.

## 1.2 Objectivos

Esta dissertação surge no âmbito de um projecto cujo objectivo é desenvolver um sistema de aconselhamento energético para uma habitação. O projecto é dividido em duas fases, a construção de uma plataforma de hardware e sensores necessários à monitorização dos consumos eléctricos de uma habitação, e a implementação dos algoritmos que permitam ao sistema aconselhar os utilizadores na optimização dos recursos eléctricos disponíveis.

O presente trabalho visa essencialmente responder à primeira fase do projecto, ou seja, a construção de um sistema electrónico capaz de monitorizar os consumos de energia eléctrica realizados numa habitação. Pretende-se projectar e construir um sistema capaz de medir e mostrar, em tempo real, num pequeno ecrã os dados dos consumos de energia eléctrica de uma habitação. O

sistema deve ainda permitir a ligação a um computador possibilitando a gravação e a análise dos dados de energia medidos.

Com o desenvolvimento deste sistema pretende-se ajudar o consumidor a otimizar e reduzir os seus consumos de energia eléctrica.

### 1.3 Organização da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, incluindo o presente capítulo da Introdução, e em três apêndices conforme se resume em seguida.

No capítulo 2, Fundamentos Teóricos, analisa-se a eficiência energética no sector doméstico e descreve-se a importância da monitorização da energia eléctrica. Este capítulo incide ainda sobre a análise do estado da arte, ou seja, o estudo dos sistemas de monitorização de electricidade actualmente existentes. São apresentados exemplos de sistemas hoje em dia comercializados, e discutidas as suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 3, Projecto do Sistema de Monitorização, apresenta o projecto e o dimensionamento do sistema de monitorização objecto desta dissertação. São descritas as diversas fases do projecto, dando maior relevância à estrutura geral do sistema, à escolha e dimensionamento dos componentes de hardware e à programação dos microcontroladores e do programa de computador.

O capítulo 4, Construção do Protótipo, descreve as diferentes fases da construção do protótipo do sistema de monitorização, nomeadamente o projecto e produção das placas de circuito impresso (PCBs), a soldadura dos componentes electrónicos e a instalação dos componentes em caixas.

No capítulo 5, Resultados Experimentais, são apresentados os testes realizados com o protótipo do sistema de monitorização desenvolvido e analisados os dados recolhidos, de forma a validar a implementação.

O sexto e último capítulo, Conclusões, aborda os aspectos relevantes da dissertação e apresenta algumas sugestões de melhoria para trabalhos futuros.

Os apêndices I, II e III incluem, respectivamente, a lista do material utilizado na construção do protótipo, os circuitos eléctricos e os *layouts* das PCBs.

A construção do sistema foi realizada no laboratório 1.5 do Departamento de Engenharia Electrotécnica da FCT-UNL, à excepção das PCBs que foram construídas no CINEL.



## Capítulo 2

# Fundamentos Teóricos

Nos fundamentos teóricos são apresentados os assuntos que constituem a introdução teórica desta dissertação. Este capítulo incide ainda sobre o estudo de alguns dos sistemas de monitorização hoje em dia comercializados.

### 2.1 Eficiência Energética no Sector Doméstico

Nos últimos anos, verificou-se um aumento do consumo de electricidade no sector doméstico na maioria dos países da UE sendo, por isso, de grande relevância a implementação de medidas com o objectivo de reduzir esses consumos (CE, 2005). Além disso, o sector doméstico oferece numerosas oportunidades de acção, em condições economicamente rentáveis, que contribuem ao mesmo tempo para o bem-estar dos cidadãos (CE, 2008b).

Reduzir o consumo de energia eléctrica é uma forma simples de diminuir os impactes ambientais resultantes da produção de electricidade. Esta redução pode resultar da diminuição de alguns consumos (iluminação, electrodomésticos, climatização, etc) ou da utilização da energia eléctrica de uma forma mais eficiente (consumindo menos electricidade por equipamento), ou então da combinação das duas (EEA, 2007). É ainda possível realizar grandes poupanças nos consumos de energia eléctrica se, durante a fase de construção ou remodelação de uma habitação, forem tomadas medidas passivas de melhoramento da sua eficiência energética.

Uma vez que as possibilidades de reduzir os consumos de energia no sector doméstico são grandes, a aposta na eficiência energética durante a construção de novas habitações contribui significativamente para uma redução dos consumos energéticos a nível mundial. Tendo em conta que na UE em 2007, cerca de 34 % do consumo de electricidade nas habitações se destina à climatização ambiente (JRC, 2009), podem ser tomadas medidas importantes nas fases de projecto e de construção com o intuito de poupar energia, nomeadamente através da utilização de bons isolamentos térmicos nas paredes e nas tubagens de água quente, utilização de vidros duplos com caixilharias de baixa transmissão térmica, entre outros (IEA, 2008).

Após a fase de construção de uma habitação (e considerando também o facto de muitas das habitações já construídas serem pouco eficientes energeticamente) é igualmente possível alcançar significativas poupanças de energia e manter um nível de conforto aceitável. Nesta fase, a eficiência energética relaciona-se essencialmente com alterações comportamentais e tecnológicas, e é frequentemente associada ao termo "Utilização Racional de Energia" (URE), que pressupõe a adopção de medidas que permitem uma melhor utilização da energia, tanto no sector doméstico, como nos sectores de serviços e indústria (EDP, 2010).

Trata-se, em primeiro lugar, de uma questão de comportamento individual e reflecte a racionalidade dos consumidores: evitar consumos de energia desnecessários e escolher os equipamentos mais eficientes que ajudem a reduzir o consumo/utilização de energia. Muitas vezes a eficiência energética é uma questão tecnológica. Por exemplo, a regulação da temperatura de uma sala, ou o desligar automático da iluminação numa divisão vazia.

Qualquer custo relacionado com a eficiência energética é o confronto entre o custo imediato e a redução da despesa da factura baseado no aumento da eficiência. Quanto maior for o preço da energia, observado ou esperado, mais atractivas serão as soluções relacionadas com a eficiência energética. Tal significa que tomar boas decisões do ponto de vista da eficiência energética quando se investe em equipamentos domésticos também são medidas acertadas do ponto de vista económico (WEC, 2008).

No sector doméstico, a eficiência energética tem vindo a melhorar significativamente nos últimos anos pelo que, até 2020 se prevê que seja ainda possível poupar cerca de 27 % da energia consumida na UE neste sector (CE, 2007).

## 2.2 A Importância da Monitorização de Electricidade

A monitorização da energia eléctrica fornece informação detalhada que pode ensinar o consumidor a reduzir os seus consumos. Ao disponibilizar em tempo real dados sobre os consumos de electricidade, os consumidores consciencializam-se do modo como certos comportamentos influenciam significativamente o seu consumo energético. O conhecimento da potência e sobretudo do custo da energia que se consome é uma importante motivação para a mudança de comportamentos (Darby, 2006).

Com a monitorização, os consumidores têm à sua disposição todo o registo histórico do seu consumo em qualquer instante. As facturas de electricidade mensais deixarão de ser uma surpresa mas sim uma confirmação das já conhecidas despesas. Uma alteração da factura de electricidade mensal normal pode assim ser explicada pelo consumidor, uma vez que estará mais ciente dos seus consumos de energia eléctrica.

No entanto, a monitorização dos consumos de electricidade não pode ser considerada, por si só, uma medida responsável pela optimização dos consumos de energia. O consumidor deve estar disposto a mudar os seus comportamentos em função da informação fornecida. Atendendo ao facto do sistema de monitorização ser por natureza um sistema passivo, se o consumidor não alterar os seus consumos, estes também não se modificam.

### 2.2.1 Estudos realizados

Existem vários estudos que demonstram que fornecendo informação instantânea às pessoas relativa aos seus gastos de electricidade é possível reduzir o consumo de energia eléctrica doméstico entre 5 % e 15 %. (Seligman & Darley, 1977). Nos últimos anos foram realizados, pelo menos, três importantes estudos:

- No documento publicado em Março de 2006, “*The Impact of Real-Time Feedback on Residential Electricity Consumption*”, Dean Mountain, um professor de economia do McMaster Institute for Energy Studies em Ontário apresentou dados relativos a um estudo realizado pela empresa canadiana Hydro One. Nas 400 casas que receberam e usaram o sistema de monitorização de energia PowerCost reduziu-se, em média, o consumo de electricidade em 6,5 %. Mountain observou que, ao longo do período do estudo, as pessoas tiveram um comportamento proactivo e mantiveram a vontade em reduzir os seus consumos (Mountain, 2006).

- No documento publicado em Abril de 2006, “*The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption*”, a investigadora Sarah Darby fez uma revisão de vários estudos sobre poupanças de electricidade e gás natural. Darby chegou à conclusão que existem poupanças de 5 % a 15 %, devido à existência de conhecimento em tempo real desses consumos (Darby, 2006).

- O artigo “*Evaluating Energy Use Feedback Devices*”, publicado em Julho/Agosto de 2008 na revista Home Energy, descreve os resultados de um estudo realizado na Florida sobre o uso de sistemas de monitorização de energia eléctrica. Três pesquisadores da Florida Solar Energy Center – Danny Parker, David Hoak e Janie Cummings – calcularam as poupanças de energia eléctrica em casas equipadas com o sistema de monitorização The Energy Detective. Concluíram que as casas com esse tipo de sistema tinham, em média, poupanças de energia eléctrica de 7,4 % (Parker, Hoak, & Cummings, 2008).

### 2.2.2 Vantagens

Como consequência de uma melhor informação sobre os consumos, o consumidor altera os seus hábitos de consumo, conduzindo a importantes vantagens:

- Ambientais: Um melhor conhecimento de como a energia eléctrica é utilizada dentro de uma habitação permite delinear medidas no sentido de melhorar a eficiência energética, minimizar desperdícios e reduzir os consumos, permitindo assim uma redução na utilização de recursos naturais

fósseis usados na produção de electricidade e, consequentemente, uma redução da emissão de gases poluentes;

- Políticas: A redução dos consumos resultante da monitorização vai de encontro às políticas energéticas e ambientais de muitos governos e que, no caso da União Europeia, se materializa na iniciativa 20-20-20<sup>1</sup>.

- Económicas: O conhecimento detalhado dos consumos de energia eléctrica possibilita a melhoria da eficiência energética, a redução do seu consumo e, consequentemente, a redução do dinheiro que se gasta com a produção e o consumo de electricidade.

## 2.3 Sistemas de Monitorização de Energia Eléctrica

O importante crescimento tecnológico verificado na área da electrónica nos últimos anos permitiu o desenvolvimento de diversos dispositivos capazes de medir, guardar e disponibilizar em tempo real a informação relativa aos consumos de energia eléctrica realizados numa habitação.

Actualmente, existem diversos tipos de sistemas que podem ser utilizados na monitorização dos consumos de electricidade domésticos. Os contadores inteligentes (*smart meters*) permitem, quer ao fornecedor quer ao consumidor, um melhor controlo da utilização da energia eléctrica. Estes contadores substituem o contador tradicional existente na maioria das casas e são capazes de fornecer ao consumidor informação detalhada dos seus consumos bem como comunicar com o fornecedor de electricidade através de uma rede de comunicação (telecontagem). Assim, além de ajudarem o consumidor na redução dos consumos e custos energéticos ajudam também o fornecedor na gestão da produção e distribuição de energia. Os contadores inteligentes podem ainda ser o instrumento chave para a implementação de infra-estruturas que dão suporte à gestão de energia, como por exemplo, a de redes inteligentes de energia (*smartgrids*).

Contudo, os contadores inteligentes são sistemas de monitorização complexos, de difícil utilização para o consumidor e bastante caros. Para o consumidor é mais prático utilizar um sistema de monitorização que seja fácil de instalar e utilizar e que apresente alguma flexibilidade. Hoje em dia, muitos destes sistemas já são comercializados e estão, portanto, acessíveis à maioria da população. Apesar de serem mais simples e baratos do que os contadores inteligentes, constituem igualmente uma excelente solução para medir e tratar os consumos eléctricos em tempo real e, consequentemente, melhorar a eficiência energética de uma habitação. Este tipo de sistema, normalmente denominado por *home energy monitor*, é desenvolvido exclusivamente para ajudar o consumidor a controlar e reduzir os seus consumos, não substitui o contador tradicional e apresenta como vantagem a sua portabilidade.

---

<sup>1</sup> Iniciativa 20-20-20: Os países da União Europeia devem cumprir até 2020 as seguintes metas: reduzir em 20% as emissões dos GEE em comparação com os níveis de 1990; aumentar o peso das energias renováveis em 20%; e reduzir em 20% o consumo de energia primária relativamente às previsões de consumo actuais utilizando medidas de eficiência energética.



Dependendo da sua sofisticação, estes sistemas podem ainda comunicar com um computador ou com um telemóvel, distribuir os dados por toda a casa com recurso à comunicação sem fios ou enviá-los pela internet permitindo assim a monitorização à distância e com a flexibilidade que a *World Wide Web* disponibiliza.

### 2.3.1 Constituição e funcionamento

De uma maneira geral, um sistema de monitorização de energia eléctrica é constituído pelos seguintes componentes:

- Sensores utilizados na leitura dos sinais analógicos de tensão e de corrente;
- Circuito integrado capaz de medir os diversos dados de energia;
- Memória não volátil para armazenar os registos históricos dos consumos de energia;
- Visor que disponibiliza, em tempo real, a informação relativa aos consumos;
- Microcontrolador que controla os restantes componentes.

Na Figura 2.1 é possível observar o diagrama de blocos geral de um sistema de monitorização de energia eléctrica.

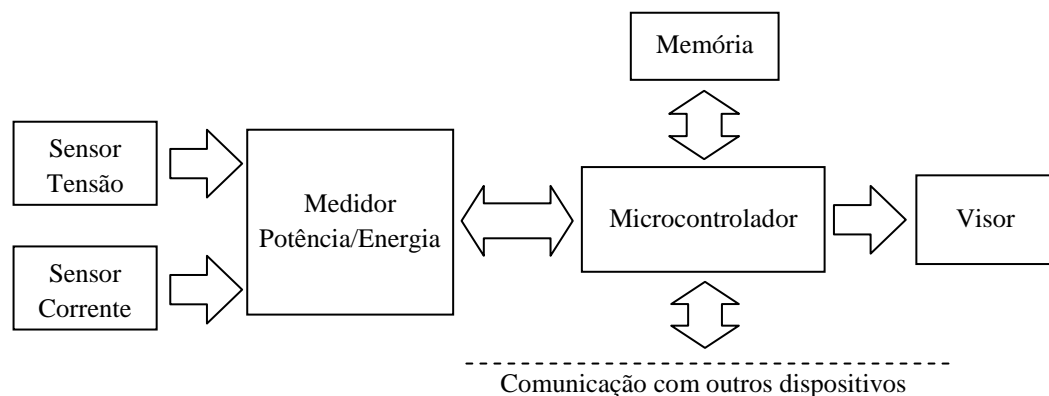


Figura 2.1 Diagrama de blocos geral de um sistema de monitorização de energia eléctrica

A leitura da tensão e da corrente é normalmente realizada através de um simples divisor resistivo ou com um transformador de tensão ou de corrente. Os sinais de tensão e de corrente depois de lidos são processados por um circuito integrado, o medidor de potência/energia. Este componente é responsável por realizar diversos cálculos, tais como, o valor eficaz da tensão e da corrente, a potência e a energia. Dependendo da sua complexidade e do facto de ler ou não o sinal de tensão, o sistema poderá calcular o factor de potência, a potência activa e a potência reactiva.

Além destes dados, e uma vez que estes sistemas possuem microcontroladores capazes de realizar complexas funções matemáticas, é igualmente possível calcular os custos energéticos, as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes, entre outros.

O microcontrolador é a unidade central de processamento do sistema sendo responsável por comunicar com o medidor de potência/energia, pedindo a informação relativa aos dados de energia medidos, guardar os registos históricos dos consumos numa memória não volátil e ainda enviar os dados para um visor, ou para outro dispositivo através de, por exemplo, comunicação sem fios, USB ou Ethernet.

### 2.3.2 Exemplos de sistemas comercializados (*home energy monitors*)

Dependendo da aplicação a que se destinam, existem sistemas de monitorização que medem os consumos de apenas um equipamento eléctrico e outros que conseguem medir os consumos totais de electricidade realizados numa habitação.

#### 2.3.2.1 Monitorização ao nível do equipamento eléctrico

Os sistemas que medem os consumos ao nível do equipamento eléctrico, normalmente denominados sistemas *plug-in*, ligam-se entre a tomada eléctrica e o equipamento cujos consumos se pretendem monitorizar. São capazes de ler os sinais de tensão e de corrente (através de simples divisores resistivos) e de medir e calcular a potência, a energia e os custos energéticos. Existem sistemas deste tipo que possuem um pequeno visor onde é possível visualizar os dados de energia medidos e outros que, não possuindo visualização, enviam os dados através de comunicação sem fios para um outro dispositivo, como o computador ou o telemóvel. No computador o consumidor poderá não só visualizar os dados de energia obtidos pelo sistema como também realizar cálculos e análises mais complexas, como por exemplo, gráficos diários de consumo.

Os sistemas *plug-in* são baratos, fáceis de utilizar e muito úteis para medir consumos pontuais. No entanto, não fornecem um “panorama completo” do consumo de energia em casa. Para se ter uma visão abrangente com sistemas deste tipo ter-se-ia que instalar um sistema *plug-in* por cada equipamento eléctrico da habitação, o que representa uma solução pouco funcional e dispendiosa.

Diversos sistemas de monitorização do tipo *plug-in* são hoje comercializados por algumas empresas. De seguida são apresentados alguns desses sistemas.

##### ○ Kill A Watt GT P4480

O Kill A Watt Graphic Timer P4480, ilustrado na Figura 2.2, é desenvolvido pela empresa P3 International. Além de medir e monitorizar os consumos de energia eléctrica, pode também ser programado para ligar/desligar o equipamento que estiver a monitorizar, o que ajuda a reduzir os consumos *standby*. É possível programar a função ligar/desligar em 96 configurações diferentes ao longo do dia e da semana. Este sistema protege igualmente o equipamento que estiver a monitorizar contra sobretensões e curto-circuitos.



Figura 2.2 Kill A Watt GT P4480

O Kill A Watt GT P4480 apesar de não ser um sistema de grandes dimensões possui um visor LCD grande, o que facilita a leitura dos dados. Consegue medir e calcular o valor eficaz da tensão e da corrente, a potência aparente, a energia aparente e os custos energéticos. Como não mede a potência activa, em equipamentos com baixo factor de potência, apresenta um erro considerável nos valores calculados de potência e, consequentemente, nos valores de energia e dos custos energéticos. Além disso, não guarda os registos históricos do consumo, o que dificulta a monitorização dos mesmos (P3 International, 2008).

#### ○ Plogg

O Plogg, ilustrado na Figura 2.3, é um sistema simples e prático que envia os dados de energia através de transmissão Zigbee ou Bluetooth para um computador ou telemóvel. O sistema vem com um programa (Plogg Manager) que pode ser usado no telemóvel ou no computador para visualização dos dados de energia enviados pelo sistema. Além dos habituais dados de energia, este sistema é capaz de medir também a potência reactiva.



Figura 2.3 Plogg e Plogg Manager

O Plogg pode ser vendido com um sensor de corrente externo (transformador de corrente *split core* de 100 A), o que possibilita a medição da corrente de um circuito eléctrico. Com este sistema é assim também possível monitorizar os consumos de energia eléctrica de um circuito ou de toda a casa (Plogg International, 2008).

### ○ Power-Mate

O Power-Mate, ilustrado na Figura 2.4, é um sistema desenvolvido pela empresa australiana CCI (Computer Control Instrumentation). Tal como o Kill a Watt GT P4480, possui um visor que disponibiliza os diversos dados de energia medidos, incluindo a potência activa e a reactiva. Este sistema apresenta igualmente uma estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> resultantes.



Figura 2.4 Power-Mate

Uma característica importante deste sistema é a sua elevada resolução e sensibilidade, permitindo medições de 1/1000 A e de 1/10 W. A versão mais avançada possui interface série para comunicação com o computador, onde podem ser guardados e analisados os dados de energia medidos (CCI, 2006).

### ○ EnergyHub

Considerada uma das melhores invenções de 2009 pela revista Time, o EnergyHub, ilustrado na Figura 2.5, oferece muitas funcionalidades e mostra a informação relativa aos consumos energéticos de uma forma simples e atractiva para o utilizador, através de gráficos e animações.



Figura 2.5 EnergyHub

A inteligência do EnergyHub encontra-se no painel de controlo (*dashboard*), que não é mais do que um Ultra-Mobile PC e, como tal, possui um ecrã táctil. O painel de controlo comunica, através

de ligação sem fios Zigbee de baixo consumo, com as unidades de controlo de temperatura e as tomadas/medidores de electricidade, e organiza a informação de uma maneira fácil de ser lida e compreendida pelo utilizador.

Este sistema permite ainda ligar/desligar equipamentos eléctricos à distância. Por exemplo, é possível programar o sistema para que desligue as luzes a determinadas horas do dia. Além disso, possui memória interna para armazenamento de dados e permite comunicação com internet ou com dispositivos sem fios (EnergyHub, 2009).

A Tabela 2.1 mostra algumas especificações e as principais funcionalidades dos sistemas de monitorização *plug-in* apresentados.

| Sistema                          | Kill A Watt<br>GT P4480 | Plogg        | Power-Mate  | EnergyHub <sup>(1)</sup> |
|----------------------------------|-------------------------|--------------|-------------|--------------------------|
| Gama de tensão<br>(V)            | 80 - 125                | 205 - 276    | 170 - 270   | -                        |
| Corrente máxima<br>(A)           | 15                      | 100          | 10          | -                        |
| Medição do factor<br>de potência | Não                     | Sim          | Sim         | Sim                      |
| Visor                            | Sim                     | Não          | Sim         | Sim (Táctil)             |
| Transmissão sem<br>fios          | Não                     | Sim (ZigBee) | Não         | Sim (ZigBee)             |
| Armazenamento<br>dos dados       | Sim                     | Sim          | Sim         | Sim                      |
| Ligação ao<br>computador         | Não                     | Sim (USB)    | Sim (Série) | Sim                      |
| Erro de medição<br>(%)           | < 0,2                   | < 0,5        | < 1         | -                        |
| Preço (€)                        | 55                      | 282          | 200         | -                        |

<sup>(1)</sup> A informação relativa ao EnergyHub é muito limitada, visto que o sistema ainda se encontra em fase de testes (sendo prevista a sua comercialização no final de 2010).

Tabela 2.1 Comparação de sistemas de monitorização ao nível do equipamento eléctrico

A monitorização de energia eléctrica ao nível do equipamento eléctrico não é ideal em situações nas quais o consumidor pretenda monitorizar os consumos totais de electricidade realizados em casa. Para este efeito existem sistemas capazes de medir os consumos totais realizados numa habitação - ao nível do contador electromecânico ou ao nível do quadro eléctrico.

### 2.3.2.2 Monitorização ao nível do contador electromecânico

A forma mais simples e barata de monitorizar os consumos totais realizados numa habitação é a utilização de um sensor que meça a velocidade de rotação do disco de alumínio existente no contador electromecânico, convertendo-a para um valor correspondente de potência. Estes sistemas lêem a actividade do contador electromecânico instalado na maioria das casas e calculam apenas a potência activa, a energia activa e os custos energéticos. Como não medem a tensão nem a corrente, não precisam de qualquer sensor para esse efeito. Os dados medidos são depois transmitidos, através de comunicação sem fios, para um dispositivo portátil que possui um pequeno visor. Neste grupo, existem ainda sistemas que podem ser ligados ao computador, onde é possível guardar os dados de energia medidos e mostrar gráficos de consumo.

No entanto, este tipo de sistema possui algumas limitações, uma vez que nem todos os contadores electromecânicos instalados nas casas são iguais e, como tal, o sensor utilizado pode não ser compatível com o contador existente. Acresce ainda o facto de, nos sistemas que não possuem ligação a um computador, os dados de energia serem apenas medidos mas não armazenados. Deste modo, não é possível o conhecimento dos consumos enquanto se está a dormir ou fora de casa. A exactidão deste equipamento depende não só do sensor utilizado como também do contador electromecânico existente em casa. Apesar destas limitações, este sistema apresenta um preço baixo tendo em conta que realiza a monitorização dos consumos totais de electricidade.

O PowerCost Monitor 28000 (Figura 2.6) e o PowerMonitor EM100B (Figura 2.7) são dois exemplos de sistemas que monitorizam os consumos totais de electricidade com base na leitura da actividade do contador electromecânico.



Figura 2.6 PowerCost Monitor 28000



Figura 2.7 PowerMonitor EM100B

A Tabela 2.2 apresenta algumas especificações e as principais funcionalidades do PowerCost Monitor 28000 e do PowerMonitor EM100B.

| Sistema  | PowerCost Monitor 28000 | PowerMonitor EM100B |
|--|-------------------------|---------------------|
| Resolução da potência (W)                        | -                       | 100                 |
| Factor de potência (introduzido pelo utilizador) | Não                     | Sim                 |
| Visor  | Sim                     | Sim                 |
| Transmissão sem fios                             | Sim                     | Sim                 |
| Armazenamento dos dados                          | Não                     | Não                 |
| Ligação ao computador                            | Não                     | Não                 |
| Erro de medição (%)                              | < 1                     | < 2,2               |
| Preço (€)  | 87                      | 79                  |

Tabela 2.2 Comparação de sistemas de monitorização ao nível do contador electromecânico

### 2.3.2.3 Monitorização ao nível do quadro eléctrico

Outra forma de medir os consumos totais de electricidade é utilizar sistemas de monitorização de energia eléctrica com sensores de corrente, normalmente transformadores de corrente *split-core*, que podem ser ligados a um circuito do quadro eléctrico de uma habitação. Com este tipo de sensores não é necessário interromper o circuito e é possível medir correntes superiores às medidas com os sistemas *plug-in*, devido à natureza do tipo de sensor de corrente utilizado.

Existem sistemas deste tipo que possuem um único dispositivo responsável por medir e disponibilizar num pequeno visor a informação relativa aos consumos. No entanto, os sistemas mais práticos possuem dois dispositivos, que comunicam entre si utilizando comunicação sem fios. Um dos dispositivos lê, mede e transmite os dados de energia a um outro dispositivo, normalmente portátil, que disponibiliza os dados recebidos num visor podendo ainda comunicar com um computador ou um telemóvel.

Com este tipo de sistemas é possível monitorizar o consumo total de energia eléctrica de uma habitação, e ter conhecimento desses consumos em qualquer lugar. No entanto, são sistemas caros e a sua instalação acarreta certos perigos, ao contrário dos outros sistemas, sendo aconselhado que seja realizada por um técnico habilitado.

De seguida são apresentados alguns sistemas de monitorização ao nível do quadro eléctrico hoje em dia comercializados.

#### ○ Wattson

Criado pela empresa inglesa Diy Kyoto, o Wattson é um sistema simples e com um design interessante. É constituído por um sensor de corrente (transformador de corrente *split core*), um transmissor sem fios e um módulo de visualização. O sensor de corrente e o transmissor sem fios são instalados no quadro eléctrico para medir a corrente de um circuito. O módulo de visualização possui um visor alfanumérico, recebe o valor de corrente lido pelo sensor e calcula a potência, a energia e os custos e emissões de CO<sub>2</sub> associadas. Na Figura 2.8 está ilustrado o módulo de visualização do Wattson.



Figura 2.8 Wattson

O Wattson pode ser ligado ao computador por USB, onde interage com um programa chamado Holmes, que disponibiliza gráficos diários do consumo. Possui ainda um conjunto de luzes que mudam de cor conforme a quantidade de energia eléctrica que estiver a ser consumida (azul significa pouco consumo e vermelho indica elevado nível de consumo).

Contudo, este sistema não mede a tensão do circuito e, por isso, não calcula o factor de potência. Logo em circuitos com baixo factor de potência, o Wattson apresenta um erro considerável nos valores calculados de potência e, consequentemente, nos valores de energia e custos energéticos (Diy Kyoto, 2006).

#### ○ Elite

O Elite, ilustrado na Figura 2.9, é desenvolvido pela empresa Efergy. Tal como o Wattson, é constituído por um sensor de corrente, um transmissor sem fios e um módulo de visualização.

Este sistema tem a capacidade de guardar os dados medidos no próprio equipamento e mostrar no visor os gráficos de consumo, motivo pela qual, provavelmente, a empresa tenha optado por não disponibilizar uma ligação para comunicação com o computador. Este facto pode também ser visto



como uma vantagem, na medida em que o utilizador tem acesso a muita informação sobre os consumos energéticos (potência, energia, custos, emissões de CO<sub>2</sub>) num único dispositivo. O sistema tem capacidade para guardar os dados recolhidos durante dois anos.

No entanto, apresenta o mesmo problema de exactidão que o sistema Wattson, no que diz respeito ao cálculo de potência, visto que apenas lê a corrente e despreza o factor de potência (Efergy, 2009).

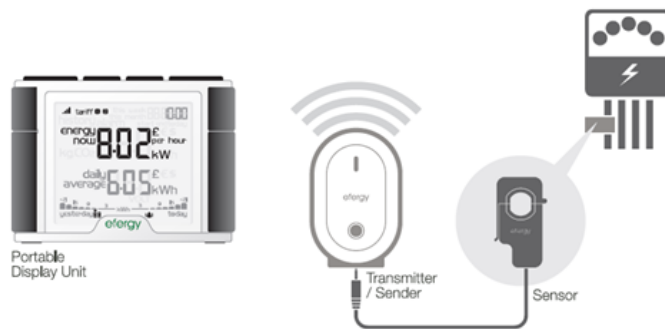


Figura 2.9 Elite

○ TED 5000 (The Energy Detective)

O TED 5000, desenvolvido pela empresa Energy Inc, é um sistema de monitorização que apresenta uma relação desempenho-preço superior à maioria dos sistemas apresentados.



Figura 2.10 TED 5000

Este sistema, ilustrado na Figura 2.10, é constituído por um sensor de corrente, um módulo de visualização e um módulo de leitura da tensão, que é instalado numa tomada. O sensor de corrente e o de leitura da tensão possuem um transmissor sem fios para comunicação com o módulo de visualização. Os valores de tensão e de corrente lidos são transmitidos para o módulo de visualização do TED, através de comunicação sem fios Zigbee, que calcula diversos dados de energia, incluindo a potência activa e a potência reactiva.

O TED 5000 consegue armazenar dez anos de dados operacionais podendo ser ligado ao computador através de uma ligação Ethernet. No computador é possível visualizar os dados em tempo

real e funcionar com o Google PowerMeter, um programa grátis desenvolvido pela Google, que disponibiliza gráficos diários do consumo, obtidos a partir dos dados de energia enviados pelo TED (TED, 2009).

#### ○ CW120

O CW120, ilustrado na Figura 2.11, é desenvolvido pela empresa japonesa Yokogawa. Ao contrário do TED 5000, o CW120 possui apenas um dispositivo que lê a tensão e a corrente e que disponibiliza a informação num visor LCD.



Figura 2.11 CW120

Este sistema consegue medir o valor eficaz da tensão e da corrente, a potência activa e reactiva, o factor de potência, a energia activa e a frequência. Permite também guardar todos estes dados numa memória interna ou num cartão que pode depois ser usado num computador. Este sistema é vendido com um programa de computador que analisa os dados guardados no cartão.

O CW120 foi desenvolvido para ser utilizado sobretudo no sector de serviços, sendo possível medir tensões de 450 V e correntes de 1000 A e monitorizar até três circuitos eléctricos ao mesmo tempo. Devido a estas funcionalidades e ao facto de possuir um erro de medição baixo (inferior a 1,2%), o CW120 apresenta um preço bastante elevado (900 € na versão mais simples) (Yokogawa, 2001).

A Tabela 2.3 compara os sistemas apresentados de monitorização de energia eléctrica ao nível do quadro eléctrico.

| Sistema                       | Wattson   | Elite | TED 5000       | CW120       |
|-------------------------------|-----------|-------|----------------|-------------|
| Gama de tensão (V)            | -         | -     | -              | 150 - 495   |
| Corrente máxima (A)           | 54        | 85    | 100            | 1000        |
| Medição do factor de potência | Não       | Não   | Sim            | Sim         |
| Visor                         | Sim       | Sim   | Sim            | Sim         |
| Transmissão sem fios          | Sim       | Sim   | Sim            | Não         |
| Armazenamento dos dados       | Sim       | Sim   | Sim            | Sim         |
| Ligação ao computador         | Sim (USB) | Não   | Sim (Ethernet) | Sim (RS232) |
| Erro de medição (%)           | -         | < 8   | < 2            | < 1,2       |
| Preço (€)                     | 116       | 47    | 183            | > 900       |

Tabela 2.3 Comparação de sistemas de monitorização ao nível do quadro eléctrico

Além dos sistemas apresentados existem muitos outros a ser comercializados, como por exemplo: Owl CM119, Tweet-a-Watt, PowerCost, Energy Check 3000, iMeter e nPower.

### 2.3.3 O futuro dos sistemas de monitorização

Os sistemas de monitorização de energia do futuro deverão não só fazer o controlo da energia eléctrica de uma habitação, como também o controlo do consumo de gás, água e calor. O designer Stuart James Sharples projectou um sistema com estas capacidades, designado EnergyMate, e que pode ser visualizado na Figura 2.12.



Figura 2.12 Projecto EnergyMate

O EnergyMate é constituído por uma unidade central com um visor LCD e por sensores de gás, água, temperatura, iluminação e electricidade. Todos estes sensores comunicam com a unidade central através de comunicação sem fios. O visor LCD é tátil e mostra gráficos e animações que indicam consumos, custos e emissões de CO<sub>2</sub>.

Ao contrário da maioria dos sistemas hoje em dia comercializados, este sistema permite que sejam controlados e monitorizados os consumos não só de electricidade mas também de água e de gás, o que representa um factor muito importante na redução da energia consumida em casa. Se as projecções apontam para uma redução dos consumos de 5 % a 15 % apenas através da monitorização de electricidade, então com a monitorização de mais tipos de energia é possível atingir poupanças ainda maiores (EnergyMate, 2010).

## Capítulo 3

# Projecto do Sistema de Monitorização

O projecto do sistema de monitorização compreende diversas fases, dando-se maior relevância à estrutura geral do sistema, à escolha e dimensionamento dos componentes de hardware, à programação dos microcontroladores e ao desenvolvimento do software aplicacional.

### 3.1 Descrição do Sistema

Ao longo deste trabalho foi projectado e construído um sistema de monitorização de energia eléctrica com o objectivo de ajudar o consumidor a reduzir os seus consumos domésticos. O sistema é capaz de medir e calcular em tempo real diversos dados de energia, nomeadamente o valor eficaz da tensão e da corrente, a potência activa, o factor de potência, a energia consumida e os custos. Com o conhecimento destes dados, o consumidor poderá tomar decisões fundamentadas sobre como alterar os seus hábitos de consumo de electricidade ou substituir os equipamentos eléctricos menos eficientes.

O sistema desenvolvido é composto por dois dispositivos electrónicos: o dispositivo de aquisição de dados e o dispositivo de visualização de dados, ilustrados na Figura 3.1.



Figura 3.1 Dispositivos do sistema de monitorização desenvolvido

O dispositivo de aquisição de dados é responsável por medir os consumos eléctricos e o dispositivo de visualização de dados por mostrar, num pequeno ecrã, a informação relativa a esses consumos. A troca de informação entre os dois dispositivos é feita com recurso à comunicação sem fios. O dispositivo de visualização de dados é um equipamento portátil e, por isso, os consumos de electricidade podem ser visualizados em qualquer ponto da casa longe do local de aquisição. Desta forma, o sistema torna-se uma fonte de informação facilmente acessível a qualquer utilizador.

Outra característica deste sistema é a sua capacidade de monitorizar os consumos não só de um determinado equipamento eléctrico, como também de um circuito do quadro eléctrico de uma habitação. Esta funcionalidade permite ao utilizador conhecer informação detalhada dos consumos por equipamento eléctrico individual (televisor, frigorífico, torradeira, etc) ou por aplicação eléctrica (circuito de iluminação, de climatização, etc). É assim possível perceber qual o peso que cada aplicação ou equipamento eléctrico tem nos consumos totais de energia eléctrica.

O sistema de monitorização desenvolvido permite também uma ligação a um computador, através de uma ligação USB. No PC, é possível o armazenamento dos dados de energia e a sua posterior utilização em aplicações informáticas diversas. Para este projecto e a título exemplificativo desta capacidade foi desenvolvida uma pequena aplicação que permite visualizar gráficos diários de consumo.

### 3.2 Estrutura Geral

Como já foi referido, o sistema de monitorização é composto por dois dispositivos que comunicam entre si através de comunicação sem fios. O dispositivo de aquisição lê os sinais analógicos de tensão e de corrente do equipamento ou circuito eléctrico, cujos consumos se pretendem monitorizar, e comunica esses dados ao dispositivo de visualização. Este é responsável por disponibilizar ao utilizador a informação recebida podendo ainda enviar os dados para um computador através de comunicação USB. A Figura 3.2 ilustra o diagrama de blocos geral do sistema de monitorização.



Figura 3.2 Diagrama de blocos geral do sistema de monitorização

### 3.2.1 Dispositivo de aquisição de dados

O dimensionamento do dispositivo de aquisição de dados foi dividido em cinco blocos principais: o condicionamento de sinal, o medidor de potência, o microcontrolador, o transceptor sem fios e a fonte de alimentação. No decorrer deste capítulo vão ser detalhados cada um destes blocos, com a caracterização e descrição do seu funcionamento. A Figura 3.3 ilustra o diagrama de blocos do dispositivo de aquisição de dados.

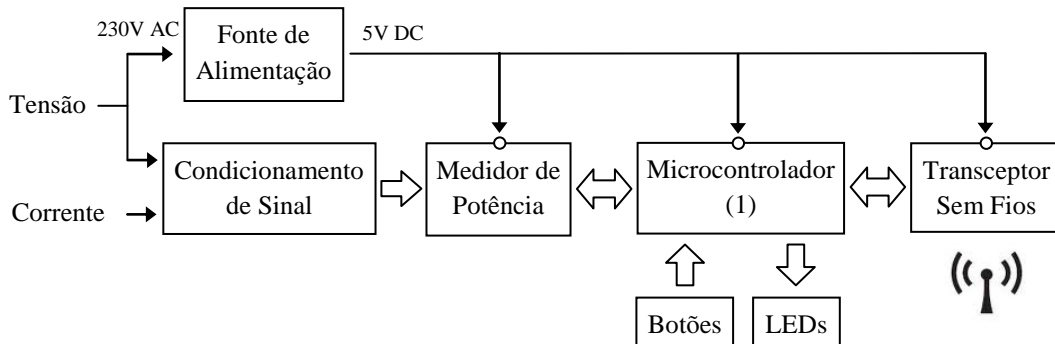


Figura 3.3 Diagrama de blocos do dispositivo de aquisição de dados

O dispositivo de aquisição de dados começa por ler os sinais de tensão e de corrente com recurso a sensores adequados. Os sinais lidos são depois condicionados, através de divisores resistivos e de filtros passa-baixo, de forma a ajustá-los aos níveis exigidos pelo medidor de potência. Este mede os dados de energia (valor eficaz da tensão e da corrente, factor de potência e potência activa) e transmite essa informação ao microcontrolador.

O microcontrolador calcula a energia consumida, com base no valor de potência activa recebido, e comunica com um transceptor sem fios. Este transceptor é depois responsável por enviar todos os dados medidos e calculados para o dispositivo de visualização e receber deste os comandos do utilizador. O microcontrolador comunica também com três LEDs, que indicam o estado de funcionamento do dispositivo, e com um botão de pressão responsável pelo *reset* do dispositivo.

A alimentação do dispositivo de aquisição de dados é de 5 V DC, obtida da transformação e rectificação do sinal de tensão recebido da rede eléctrica (230 V AC).

### 3.2.2 Dispositivo de visualização de dados

O dispositivo de visualização de dados é composto por quatro blocos principais: o visor LCD, o microcontrolador, o transceptor sem fios e a fonte de alimentação. Estes blocos serão também analisados com maior detalhe no decorrer do presente capítulo. O diagrama de blocos do dispositivo de visualização de dados encontra-se ilustrado na Figura 3.4.

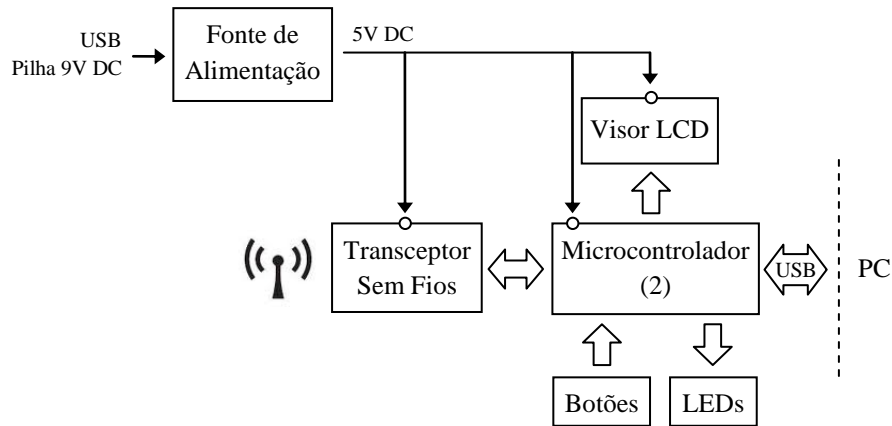


Figura 3.4 Diagrama de blocos do dispositivo de visualização de dados

O dispositivo de visualização de dados recebe os dados de energia medidos e calculados pelo dispositivo de aquisição de dados através do transceptor sem fios. Este transceptor comunica a informação recebida ao microcontrolador.

O microcontrolador controla todo o fluxo de informação - envia os dados para o visor LCD, comunica com o computador através da interface USB, recebe os comandos dos botões e controla os LEDs. Além destas funções, o microcontrolador é ainda responsável por calcular o custo de energia, com base nos dados recebidos e na tarifa introduzida pelo utilizador.

O dispositivo tem cinco botões de pressão, um de *reset* do dispositivo e outros quatro que permitem ao utilizador seleccionar e executar diversas funções mostradas no visor, tais como, inicializar a medição, inserir tarifa energética ou calibrar o medidor de potência.

A alimentação é realizada através de uma pilha de 9 V DC ou através da interface USB que disponibiliza uma tensão de alimentação de 5 V DC com corrente suficiente para alimentar o dispositivo.

### 3.3 Hardware

De seguida são apresentados os principais componentes electrónicos utilizados na implementação do sistema, nomeadamente os microcontroladores, os transceptores sem fios, o módulo LCD, o medidor de potência e o sensor de corrente. Neste subcapítulo é também descrito o dimensionamento das fontes de alimentação de cada um dos dispositivos bem como o condicionamento de sinal realizado no dispositivo de aquisição de dados.



### 3.3.1 Medidor de potência

Durante o projecto do dispositivo de aquisição de dados foi essencial definir como medir a potência activa a partir dos sinais analógicos de tensão e de corrente lidos. Depois de estudar e analisar as diferentes possibilidades constatou-se que a utilização de um circuito integrado analógico desenvolvido exclusivamente para a medição da potência traria muitas vantagens. Para além de centrar toda a complexidade de cálculo num único circuito, estes componentes são bastante precisos e baratos.

Actualmente estes circuitos integrados são comercializados por diversas empresas, nomeadamente, a Analog Devices, a Cirrus Logic, a Microchip e a Sames. No dispositivo de aquisição de dados foi utilizado o CS5463 da Cirrus Logic (Figura 3.5), pois é um componente fácil de programar e um dos poucos que mede o factor de potência. Outro motivo que influenciou a sua escolha prende-se com o facto de este apresentar um bom suporte técnico o que facilitou o estudo do seu funcionamento e a sua instalação.



Figura 3.5 Medidor de potência CS5463

O CS5463, cujo diagrama de blocos se encontra ilustrado na Figura 3.6, faz parte de uma nova geração de circuitos integrados analógicos para a aquisição de dados que combina dois conversores ADC sigma-delta, amplificadores de ganho programável, compensação de deslocação de fase, tensão de referência interna, filtros digitais, interface para comunicação série e um processador de cálculo de alta velocidade.

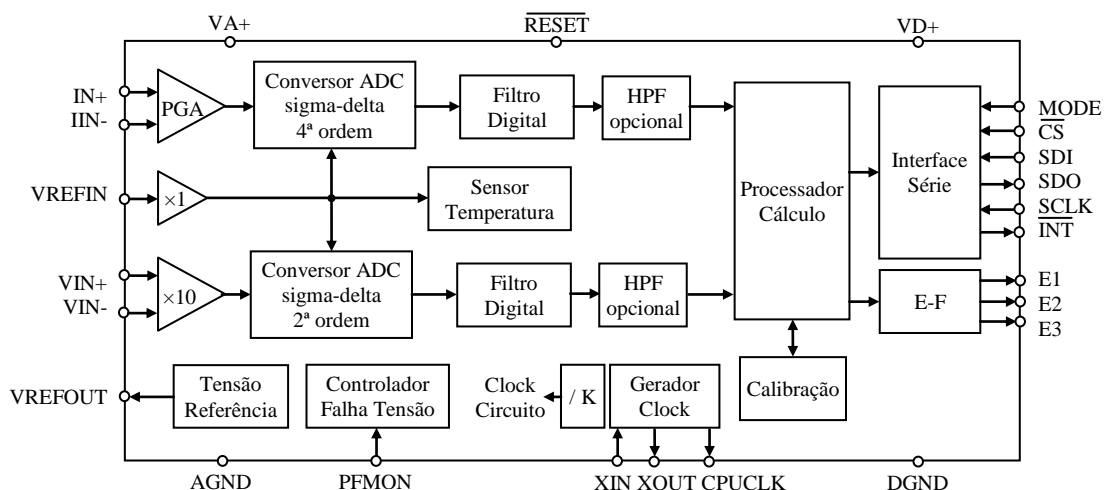


Figura 3.6 Diagrama de blocos do CS5463

Este circuito possui duas entradas diferenciais ( $I_{IN}$  e  $V_{IN}$ ) destinadas aos sinais de tensão e de corrente. As duas entradas recebem valores de tensão pelo que o sinal de corrente deve ser convertido para valores de tensão antes de entrar no circuito. A entrada de tensão tem um ganho de 10 enquanto que a entrada de corrente tem um ganho que pode ser programável (PGA) entre 10 e 50. Neste caso, foi escolhido um ganho de 10 para a entrada de corrente. Para estes ganhos, cada entrada diferencial tem um valor máximo de tensão igual a 0,5 V pico a pico, ou seja, um valor eficaz igual a  $0,5 \text{ V} / (2 \times \sqrt{2}) = 0,177 \text{ V}$  para ondas sinusoidais. Por isso, os sinais de entrada foram condicionados de forma a os ajustar a esses níveis máximos. O condicionamento destes sinais é descrito com mais detalhe no capítulo 3.3.7.

Os sinais analógicos de tensão e de corrente lidos são depois convertidos através de conversores ADC sigma-delta para que possam ser utilizados pelo processador no cálculo dos parâmetros energéticos. Este processador consegue calcular a potência instantânea, o valor eficaz da tensão e da corrente, a potência aparente, a potência activa e reactiva e o factor de potência com uma exactidão de cálculo de 0,1 %, desde que a entrada de tensão tenha um valor entre 5 % e 100 % e a entrada de corrente entre 0,2 % e 100 % dos seus máximos (0,5 V pico a pico).

A interface com o microcontrolador é facilitada pela utilização de um barramento SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*), através do qual se torna possível ajustar diversas propriedades do CS5463 e comunicar os dados medidos ao microcontrolador. A comunicação SPI é realizada através de quatro pinos: CS (*Chip Select*), SCLK (*Serial Bit clock*), SDI (*Serial Data In*) e SDO (*Serial Data Out*).

Uma das particularidades do CS5463 é o facto de poder ser calibrado digitalmente por software. Este processo compensa os valores de *offset* DC e AC dos canais de tensão e de corrente, e consequentemente, melhora a exactidão do medidor. Para calibrar o CS5463 é necessário ter nas duas entradas diferenciais um valor de tensão de 0 V (GND) e enviar, através do microcontrolador, o comando de calibração.

O CS5463 precisa de ser alimentado com 5 V DC ( $V_{A+}$  e  $V_{D+}$ ) e funciona a uma frequência de oscilação de 4,096 MHz (XIN e XOUT). Nestas condições tem um consumo máximo de 5,8 mA. Este circuito pode ainda fornecer o sinal de oscilação ao microcontrolador através da saída CPUCLK.

Na Figura 3.7 encontra-se ilustrado o diagrama de ligações do CS5463 que mostra a finalidade de cada um dos seus pinos.

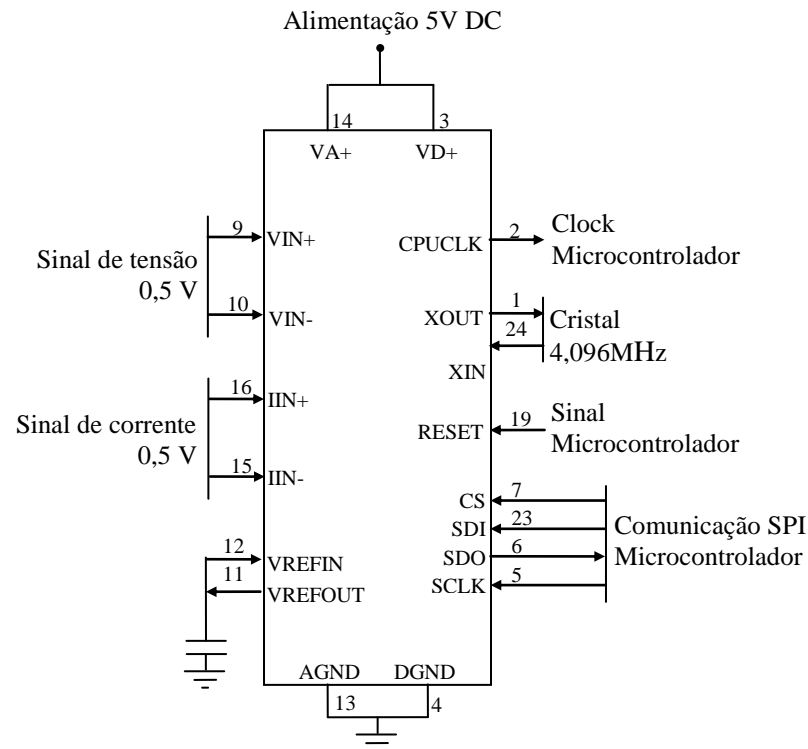


Figura 3.7 Diagrama de ligações do CS5463

### 3.3.2 Transceptor sem fios

A transmissão de informação entre o dispositivo de aquisição de dados e o dispositivo de visualização de dados é feita através de comunicação sem fios. Uma vez que cada um dos dispositivos precisa de enviar e receber dados, foi necessário utilizar um transceptor sem fios. A frequência escolhida foi 433 MHz, uma vez que é uma frequência muito utilizada em aplicações amadoras a nível mundial e que não sofre muito ruído em ambientes propícios a tal. Tendo ainda em conta aspectos como o alcance máximo e o preço, o transceptor sem fios escolhido foi o ER400TRS da EasyRadio, ilustrado na Figura 3.8.

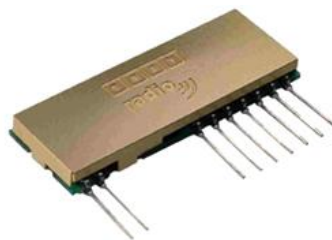


Figura 3.8 Transceptor sem fios ER400TRS

O ER400TRS é um circuito integrado constituído por um transceptor de radiofrequência (RF) de elevada complexidade e baixo custo, um microcontrolador programável e um regulador de tensão (Figura 3.9). O microcontrolador é responsável por controlar o transceptor RF e disponibilizar uma

interface de comunicação série com outro componente. Possui também uma memória EEPROM programável onde são guardados os dados de configuração dos vários modos de operação do transceptor.

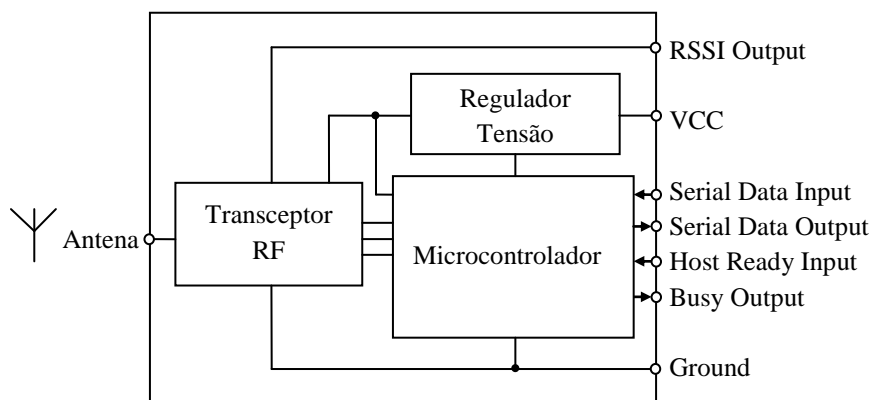


Figura 3.9 Diagrama de blocos do ER400TRS

Este transceptor possui três sinais de controlo. O sinal de saída RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) é utilizado para medir os níveis do sinal recebido. O sinal de saída *Busy* indica se o transceptor está pronto para receber dados e o sinal de entrada *Host Ready* indica se o componente ligado ao transceptor está pronto para receber os dados deste.

O ER400TRS deve ainda ser ligado a uma antena de 50  $\Omega$  de forma a assegurar um alcance razoável na transmissão e recepção dos dados (alcance máximo de 250 metros em linha de vista). No sistema desenvolvido é utilizado um simples fio unifilar com 16,4 cm de comprimento (correspondente a 1/4 de onda).

O transceptor sem fios de 433 MHz comunica com um microcontrolador através de comunicação UART (do inglês, *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*). Os dois ER400TRS utilizados na comunicação entre o dispositivo de aquisição e o dispositivo de visualização comunicam entre si a uma velocidade de 19200 Baud e podem receber e transmitir até 128 bytes de dados. Cada um destes transceptores é alimentado com 5 V DC e tem um consumo máximo de 23 mA quando está a transmitir e 12,5 mA quando está a receber.

### 3.3.3 Módulo LCD

Para visualizar a informação relativa aos consumos de energia eléctrica foi utilizado um pequeno ecrã alfanumérico de cristais líquidos (LCD). Para o dispositivo de visualização de dados foi escolhido o módulo LCD da Batron modelo BTHQ 42003AV-06, ilustrado na Figura 3.10, que possui um visor LCD de 20 caracteres  $\times$  4 linhas. A escolha deste módulo LCD deve-se sobretudo ao seu pequeno tamanho e ao facto de ter 4 linhas, o que permite disponibilizar muita informação

simultaneamente. O utilizador pode assim visualizar, ao mesmo tempo, a potência activa, a energia consumida e os custos energéticos.



Figura 3.10 Módulo LCD Batron BTHQ 42003AV-06

Este módulo é constituído por um controlador e um driver, um visor LCD 20×4 e um LED *backlight* (Figura 3.11). O controlador e o driver, desenvolvidos pela Samsung, recebem os códigos de caracteres (4 ou 8 bits) (DB0-DB7) de um microcontrolador externo, transformam esses códigos numa matriz de caracteres com 5×8 pontos e enviam os caracteres para o visor LCD. O módulo LCD possui ainda um LED *backlight* (iluminação de fundo) para facilitar as leituras durante a noite.

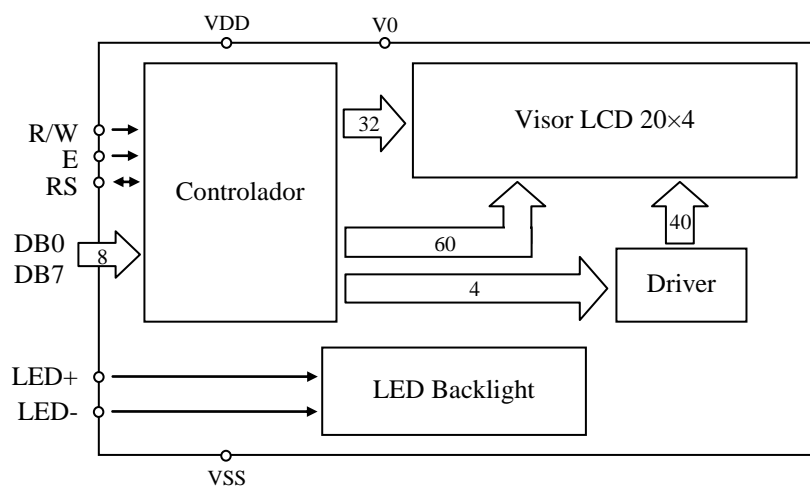


Figura 3.11 Diagrama de blocos do módulo LCD

Como o LED *backlight* consome uma corrente de 40 mA, e uma vez que o dispositivo de visualização de dados é portátil, não foi utilizada iluminação de fundo de forma a prolongar a duração da bateria do dispositivo.

O módulo LCD possui três sinais de controlo: o R/W (*Read/Write Signal*) permite seleccionar o modo de leitura ou de escrita, o RS (*Register Select Input*) é utilizado para definir se os dados enviados para o módulo são caracteres ou comandos de controlo, e o E (*Enable*) informa o módulo de um futuro processo de leitura ou de escrita.

O  $V_{DD}$  (5 V DC) e o  $V_{SS}$  (0 V) são utilizados na alimentação do módulo LCD enquanto que o  $V_0$  é utilizado para ajustar o contraste do visor. Quando  $V_{DD} = 5$  V DC este módulo tem um consumo máximo de 3,5 mA.

### 3.3.4 Microcontroladores

Para controlar os diversos componentes electrónicos e ao mesmo tempo dotar o sistema de alguma inteligência foram utilizados dois microcontroladores, um no dispositivo de aquisição de dados e outro no dispositivo de visualização de dados.

Durante a escolha de cada microcontrolador foi necessário estudar as necessidades do projecto. Como são as unidades centrais de processamento de cada dispositivo, precisam de comunicar com diversos componentes, como o CS5463 ou o ER400TRS. Neste projecto, cada microcontrolador precisa somente de trabalhar com sinais digitais e, por isso, os principais aspectos que influenciaram a sua escolha foram: o número de entradas/saídas de dados digitais, a memória interna disponível para programação e dados, o número de temporizadores (*Timers*), as interrupções disponíveis e as interfaces de comunicação que suportam. Outros factores que igualmente influenciaram a escolha foram a facilidade de programação, a disponibilidade de ferramentas de programação e de compilação, o suporte técnico, o custo e a disponibilidade no mercado.

Com base nestes factores, foram escolhidos dois microcontroladores de 8 bits da família PIC18, desenvolvidos pela Microchip. A escolha recaiu sobre microcontroladores PIC por se tratarem de circuitos de elevado desempenho e baixo custo. Além disso, a Microchip tem um bom suporte técnico, disponibiliza ferramentas de programação e de compilação baratas e o software de programação é grátis.

Como o sistema de monitorização desenvolvido não necessita de uma capacidade de processamento muito elevada foi suficiente utilizar microcontroladores com um barramento de dados de 8 bits. Os PICs de 8 bits são microcontroladores bastante utilizados numa grande variedade de aplicações, uma vez que apresentam uma relação desempenho-preço muito boa. Além disso os PICs de 8 bits, ao contrário de muitos microcontroladores tradicionais, processam as instruções e os dados em barramentos separados (arquitectura Harvard), aumentando e melhorando o desempenho global. Na Figura 3.12 é possível observar o diagrama de blocos dos microcontroladores PIC18 de 8 bits utilizados.

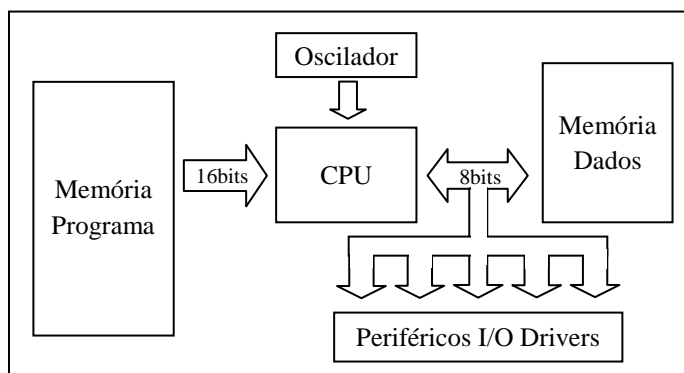


Figura 3.12 Diagrama de blocos de um microcontrolador PIC18 de 8 bits

O PIC18 é o mais avançado dentro da família de microcontroladores de 8 bits desenvolvidos pela Microchip. Utiliza um barramento de instruções de 16 bits e possui um processador (CPU) de alto desempenho com uma arquitectura RISC (do inglês, *Reduced Instruction Set Computer*) que suporta várias interrupções internas e externas. Além destas características, a família PIC18 suporta programação em linguagem C, o que facilita bastante o desenvolvimento da sua *firmware*.

#### 3.3.4.1 Dispositivo de aquisição de dados

O microcontrolador PIC18 utilizado no dispositivo de aquisição de dados foi escolhido tendo em conta que deveria suportar comunicação SPI e UART, para controlo do medidor de potência e do transceptor sem fios, respectivamente. A necessidade de uma memória de dados EEPROM para armazenar os parâmetros do sistema de modo a que estejam disponíveis quando o circuito volta a arrancar influenciou também a escolha do microcontrolador.

Para o dispositivo de aquisição de dados foi escolhido o PIC18F2420 de 28 pinos. As principais características deste microcontrolador são:

- Memória flash para programação de 12 Kbytes;
- 768 bytes de memória SRAM para dados;
- 256 bytes de memória EEPROM para dados;
- 25 pinos de entrada/saída;
- Módulo MSSP que suporta SPI e I<sup>2</sup>C;
- Módulo EUSART que pode ser configurado em modo assíncrono ou síncrono;
- 4 *Timers*: um de 8 bits e três de 16 bits;

A memória para programação do PIC18F2420 permite um máximo de 8192 instruções, número este suficiente para o desenvolvimento da *firmware* necessária ao funcionamento do dispositivo. O facto de esta memória ser do tipo flash é também importante uma vez que possibilita a reprogramação do microcontrolador. A memória de dados EEPROM também é adequada para armazenar os parâmetros do sistema, tendo em conta que são apenas guardados os valores de calibração do medidor de potência num total de 12 bytes.

Este microcontrolador oferece 25 pinos que podem ser configurados como entrada/saída de dados ou outra função especial. No entanto, para o dispositivo de aquisição de dados foi apenas necessário utilizar 13 desses pinos, cuja finalidade se encontra ilustrada na Figura 3.13.

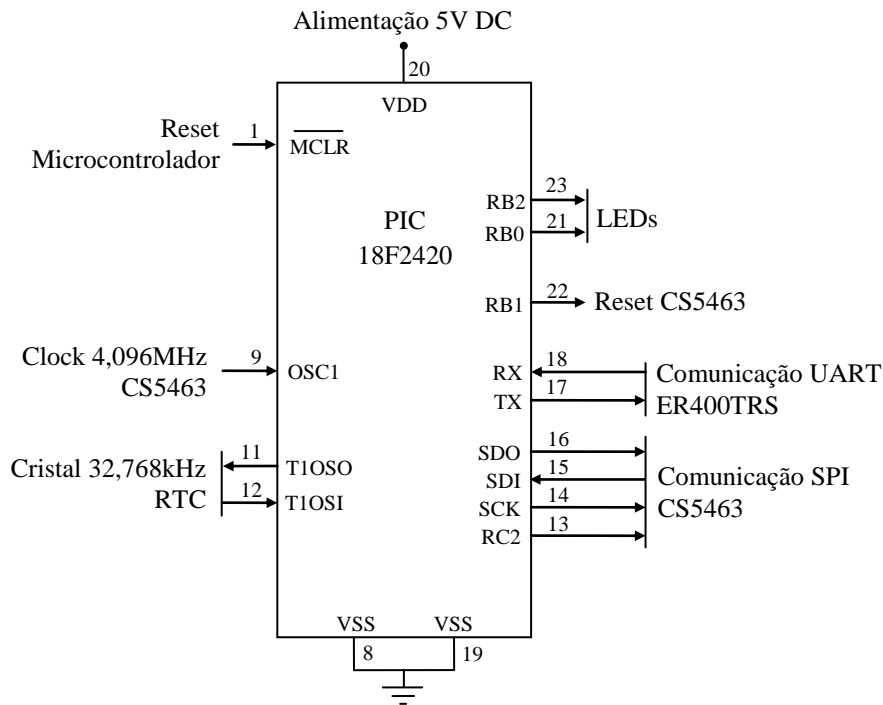


Figura 3.13 Diagrama de ligações do PIC18F2420

O PIC18F2420 é alimentado por 5 V DC ( $V_{DD}$ ) e funciona com uma frequência de oscilação de 4,096 MHz. O sinal de oscilação é fornecido pelo CS5463 e, por isso, foi utilizado o pino OSC1 para configuração de entrada de *clock* externo. O pino MCLR (*Master Clear*) foi utilizado como *reset* externo do microcontrolador.

Nos pinos T1OSO e T1OSI, correspondentes ao oscilador do Timer 1, foi utilizado um cristal de quartzo de 32,768 kHz para desempenhar a função de relógio de tempo real (RTC, do inglês *Real-Time Clock*). Este RTC é útil para o cálculo da energia consumida, que é realizada pelo microcontrolador e não pelo medidor de potência. Apesar de o CS5463 ter capacidades para calcular a energia consumida, optou-se por utilizar o PIC18F2420 para esse efeito, uma vez que assim se tem uma maior liberdade de programação.

A comunicação SPI com o medidor de potência CS5463 é garantida por quatro pinos: o RC2 (que controla o sinal CS), o SDO, o SDI e o SCK. A comunicação UART com o transceptor sem fios ER400TRS é realizada através dos pinos RX e TX. No capítulo 3.3.9 são descritos estes dois protocolos de comunicação.

Por último, o *reset* do CS5463 é controlado por RB1 enquanto que RB0 e RB2 são utilizados para controlar dois LEDs que informam o utilizador do estado de acção do dispositivo. Um deles indica se o CS5463 está a medir os dados de energia ou a ser calibrado e o outro se os dados estão a ser enviados, através de comunicação sem fios, para o dispositivo de visualização de dados.



O microcontrolador PIC18F2420 apresenta um consumo máximo de 4,5 mA, tendo em conta que funciona com  $V_{DD} = 5$  V DC, uma temperatura ambiente de 25 °C, em modo PRI\_RUN e com um oscilador externo de 4 MHz.

#### 3.3.4.2 Dispositivo de visualização de dados

Em relação ao microcontrolador do dispositivo de visualização de dados, este deve possuir uma interface UART para comunicação com o transceptor sem fios, interface USB para comunicação com o computador e um número suficiente de entradas/saídas de dados digitais para interagir com o módulo LCD, com os botões de controlo e com os LEDs.

Para responder a estas necessidades foi escolhido o PIC18F2550 de 28 pinos. As principais características deste microcontrolador são:

- Memória flash para programação de 32 Kbytes;
- 2048 bytes de memória SRAM para dados;
- 256 bytes de memória EEPROM para dados;
- 24 entradas/saídas;
- Módulo MSSP que suporta SPI e I<sup>2</sup>C;
- Módulo EUSART que pode ser configurado em modo assíncrono ou síncrono;
- Módulo SIE para comunicação USB;
- 4 *Timers*: um de 8 bits e três de 16 bits;

O PIC18F2550 é muito semelhante ao PIC18F2420, utilizado no dispositivo de aquisição de dados, o que simplificou o estudo do seu funcionamento e a programação da sua *firmware*. A única diferença relevante reside no facto de possuir uma interface USB que permite a comunicação com outros equipamentos, nomeadamente com o computador.

A memória de dados EEPROM do PIC18F2550 foi utilizada para armazenar parâmetros do sistema, tais como o preço da energia (tarifa) introduzida pelo utilizador, com uma capacidade máxima de 5 bytes.

O PIC18F2550 possui 24 pinos que podem ser configurados como entrada/saída de dados ou outra função especial, dos quais 19 foram utilizados para satisfazer as necessidades do dispositivo de visualização de dados. Na Figura 3.14 encontra-se ilustrado o diagrama de ligações do PIC18F2550 que demonstra a finalidade de cada um desses pinos.

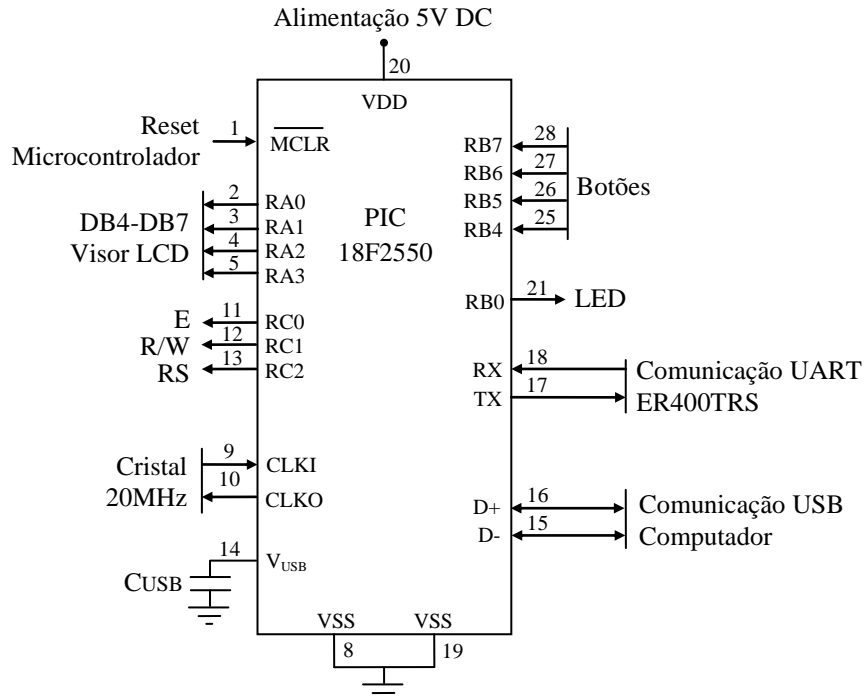


Figura 3.14 Diagrama de ligações do PIC18F2550

O PIC18F2550 é alimentado a 5 V DC ( $V_{DD}$ ) e funciona com uma frequência de oscilação de 20 MHz. O sinal de relógio é fornecido por um cristal de quartzo ligado nos pinos CLKI e CLKO. O pino MCLR (*Master Clear*) foi utilizado como *reset* externo do PIC18F2550.

Para a comunicação com o módulo LCD foram utilizados sete pinos: os quatro primeiros pinos da porta A (RA0-RA3) responsáveis por enviar os códigos dos caracteres, e os três primeiros da porta C (RC0-RC2) que enviam os sinais de controlo.

A comunicação UART com o transceptor sem fios ER400TRS é realizada através dos pinos RX e TX enquanto que a comunicação USB é assegurada pelos pinos D+ e D-. Nesta aplicação é utilizado o transceptor interno do módulo SIE para comunicação USB que é alimentado por 3,3 V DC. O sinal  $V_{USB}$  corresponde à saída do regulador de tensão de 3,3 V DC e pode ser utilizado para realizar *pull-ups* externos do D+ e D-. Para estabilizar  $V_{USB}$  foi utilizado um condensador externo.

O sinal RB0 é utilizado para controlar o LED que indica a actividade da comunicação sem fios. Por último, são utilizados quatro pinos (RB4-RB7) para receber o sinal dos botões utilizados pelo utilizador para controlo do sistema, tendo estes pinos a particularidade de gerarem uma interrupção interna.

O microcontrolador PIC18F2550 apresenta um consumo máximo de 30 mA, tendo em conta que funciona com  $V_{DD} = 5$  V DC, uma temperatura ambiente de 25 °C, em modo PRI\_RUN e com um oscilador externo de 20 MHz.

### 3.3.5 Sensor de corrente

A leitura da corrente eléctrica é realizada com um transformador de corrente *split core*. Com este tipo de sensor de corrente não é necessário interromper o circuito que se está a medir e, por isso, é possível medir os consumos de um circuito do quadro eléctrico de uma habitação.

A escolha do sensor de corrente teve em consideração a corrente máxima que se pretende medir, a secção máxima do condutor, a dimensão e o preço do sensor. O transformador de corrente *split core* escolhido foi o CR3110 da CR Magnetics, ilustrado na Figura 3.15. Este sensor consegue medir correntes monofásicas alternadas até 75 A.

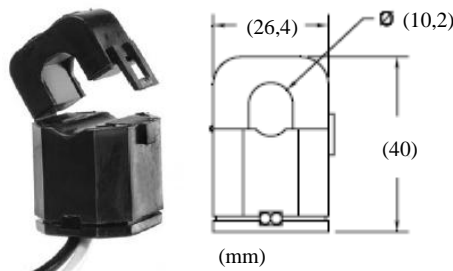


Figura 3.15 Sensor de corrente CR3110

Segundo a EDP, a maioria dos clientes residenciais possui uma potência contratada inferior a 13,8 kVA ( $I_{\max} = 60$  A). No entanto, existem habitações com potências contratadas até 41,4 kVA ( $I_{\max} = 180$  A). Sendo assim, o sensor de corrente escolhido para este projecto não pode ser utilizado em todas as habitações. Esta escolha teve em conta sobretudo o tamanho do sensor. Os sensores existentes no mercado que conseguem medir correntes alternadas superiores a 100 A são bastantes volumosos, enquanto que o sensor escolhido, o CR3110, é pequeno, prático e ideal para ser utilizado em quadros eléctricos.

O circuito eléctrico do sensor de corrente está representado na Figura 3.16, onde T2 é o transformador de corrente e Rb a resistência de *burden* utilizada no secundário do transformador para produzir uma tensão ( $U_{\text{out}}$ ) proporcional à corrente do secundário ( $I_s$ ).

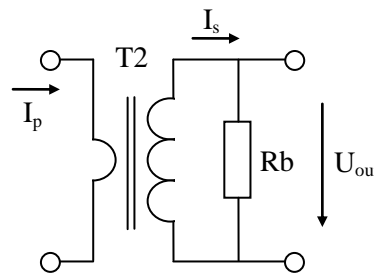


Figura 3.16 Circuito eléctrico do sensor de corrente

No entanto, a função  $U_{out}(I_p)$  só tem um comportamento linear na região do gráfico da Figura 3.17 onde as linhas estão mais escuras. Nesta zona a tensão  $U_{out}$  é dada pela seguinte equação:

$$U_{out} = \frac{I_p \times R_b}{3100} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

sendo  $I_p$  a corrente do primário e  $R_b$  a resistência de *burden* utilizada no secundário. Fora desta zona existe saturação e esta equação já não pode ser utilizada.

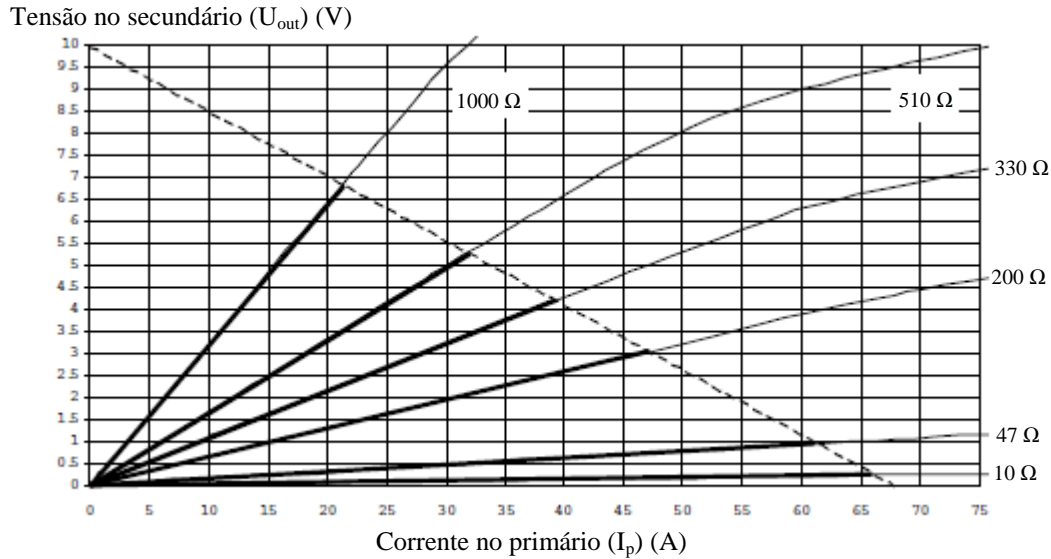


Figura 3.17 Gráfico  $U_{out}(I_p)$  para diferentes valores de  $R_b$

Uma vez que o valor da tensão no secundário representa o valor da corrente que é utilizada pelo medidor de potência CS5463 para o cálculo dos consumos de energia eléctrica e, este trabalha com valores eficazes máximos de entrada de 0,177 V, o valor da resistência  $R_b$  escolhido foi 10 Ω. Assim a tensão máxima no secundário é 0,217 V e o valor máximo da corrente alternada que o CR3110 mede dentro da zona linear é aproximadamente 65 A. O sinal de tensão do secundário do transformador de corrente precisa ainda de ser condicionado para ser inferior a 0,177 V, o valor eficaz máximo suportado pelo CS5463.

### 3.3.6 Fonte de alimentação

#### 3.3.6.1 Dispositivo de aquisição de dados

O dispositivo de aquisição de dados é alimentado a partir da rede eléctrica. Como o sistema desenvolvido necessita de realizar a leitura da tensão alternada para efeitos de cálculo do consumo eléctrico, os 230 V AC da rede foram também utilizados para alimentar o dispositivo. A tensão de alimentação escolhida para alimentar os principais componentes electrónicos do dispositivo de

aquisição de dados, nomeadamente o PIC18F2420, o CS5463 e o ER400TRS, foi de 5 V DC. Assim, foi projectada uma fonte de alimentação de 230 V AC – 5 V DC, ilustrada na Figura 3.18, que é constituída por um transformador de potência com derivação central (T1), díodos rectificadores (D1 e D2), um filtro capacitivo (C1) e um regulador de tensão (U1).

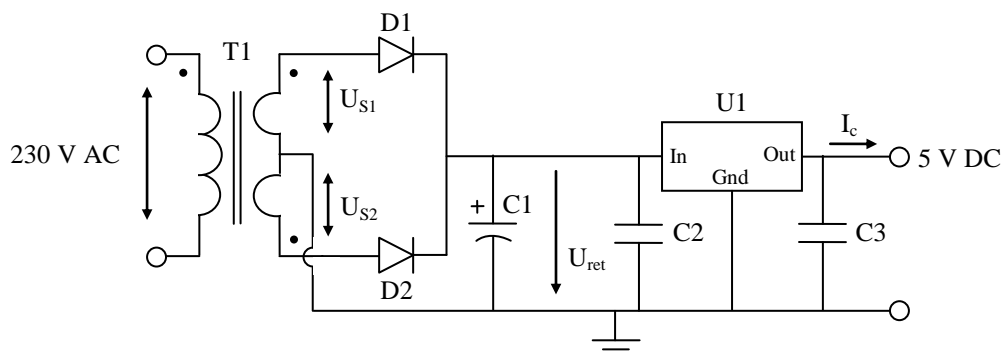


Figura 3.18 Circuito eléctrico da fonte de alimentação do dispositivo de aquisição de dados

Antes de dimensionar e escolher os componentes da fonte de alimentação foi necessário saber qual o consumo máximo do dispositivo de aquisição de dados ( $I_c$ ). Os componentes electrónicos do dispositivo de aquisição de dados que consomem energia são: o PIC18F2420, o CS5463, o ER400TRS, os LEDs e as resistências.

A corrente contínua máxima através de cada LED é de 7 mA. Como a diferença de brilho entre uma corrente de 3 mA e uma corrente de 7 mA nos LEDs utilizados é tão pequena optou-se por limitar a corrente a 3,3 mA. A tensão de condução directa ideal destes LEDs é de 1,7 V, o que resultou num valor de 1 k $\Omega$  para as resistências colocadas em série.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as correntes máximas consumidas no dispositivo de aquisição de dados.

| Componente                  | $I_c$ (mA) |
|-----------------------------|------------|
| PIC18F2420                  | 4,5        |
| CS5463                      | 5,8        |
| ER400TRS                    | 23         |
| LEDs                        | 9,9        |
| Resistências <sup>(1)</sup> | 3,5        |
| Total                       | 46,7       |

<sup>(1)</sup> Resistências utilizadas no divisor resistivo à entrada de PFMON do CS5463, no *reset* do CS5463 e no MCLR do PIC18F2420.

Tabela 3.1 Correntes máximas consumidas no dispositivo de aquisição de dados

O transformador de potência (T1) utilizado na fonte de alimentação do dispositivo de aquisição de dados deve assim ter uma corrente no secundário superior a 0,047 A. Como tal, foi utilizado o transformador de potência produzido pela Myrra de 230 V AC e 2 VA (2 saídas de 6 V AC e 0,167 A), ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 Transformador de potência Myrra 230 V - 2 VA

O transformador de potência possui isolamento galvânico e, como tal, protege o dispositivo de aquisição de dados contra sobretensões (até 4 kV) e ruído eléctrico. Além disso está ainda protegido contra curto-circuitos.

Este transformador possui um valor eficaz de tensão em vazio de  $2 \times 10,4$  V, ou seja, não consegue manter a tensão do secundário constante para diferentes valores de corrente (possui uma regulação de tensão elevada). Normalmente, esta situação ocorre em transformadores de baixa potência. Deste modo, foi considerado um  $U_{S1} = U_{S2} = 10,4$  V para efeitos de dimensionamento da fonte de alimentação.

O sinal de tensão utilizado no cálculo dos consumos eléctricos não pode ser obtido a partir do secundário do transformador, uma vez que a tensão do secundário varia muito com a corrente do secundário e o dispositivo de aquisição de dados não consome sempre a mesma corrente (consome mais quando o ER400TRS transmite dados ou quando os LEDs estão todos ligados). Assim sendo, o sinal de tensão utilizado para o cálculo do consumo de electricidade realizado pelo CS5463 é obtido no primário do transformador (230 V AC). Como o valor eficaz de entrada máximo suportado pelo CS5463 é de 0,177 V, o valor da tensão precisa ainda de ser condicionado.

O transformador T1 utilizado possui derivação central e, por isso, a rectificação de onda completa é obtida através da utilização de apenas dois díodos (D1 e D2). Estes díodos devem suportar uma corrente de condução de 0,047 A e uma tensão inversa ( $V_{rm}$ ) superior à tensão de pico do secundário do transformador ( $U_{sec}$ ). Deste modo,  $V_{rm} > U_{sec} \leftrightarrow V_{rm} > \sqrt{2} \times (U_{S1} + U_{S2}) > 29,42$  V.

Como tal, foram utilizados dois díodos de Schottky, 1N5819, com uma corrente de condução máxima ( $I_f$ ) de 1 A, uma tensão inversa máxima ( $V_{rrm}$ ) de 40 V e uma tensão limiar de condução ( $U_d$ ) de 0,55 V.

Na Figura 3.20 é possível observar as formas de onda das tensões aplicadas ao circuito rectificador ( $U_{S1}$  e  $U_{S2}$ ) e a forma de onda da tensão depois da rectificação ( $U_{ret}$ ) antes e depois do filtro capacitivo.

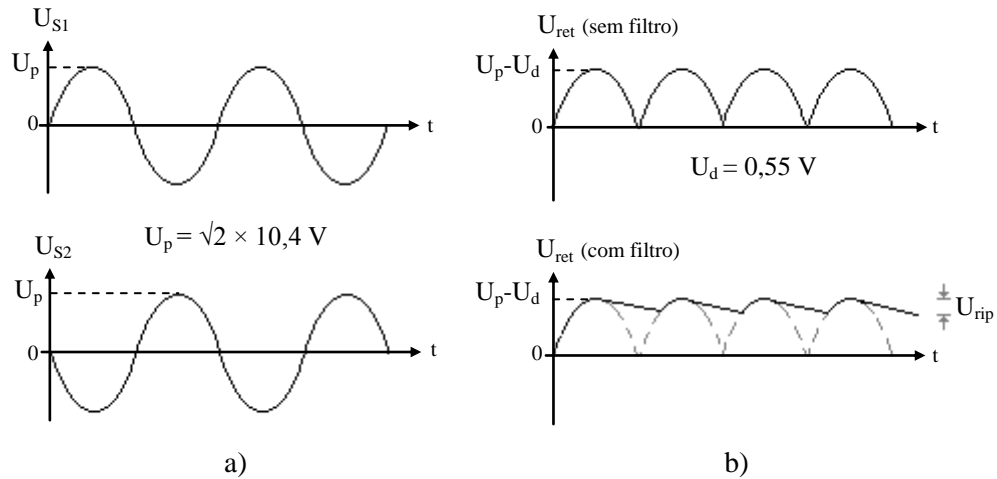


Figura 3.20 a) Formas de onda das tensões aplicadas ao circuito rectificador ( $U_{S1}$  e  $U_{S2}$ ) b) Formas de onda da tensão depois do circuito rectificador sem e com filtro

As duas saídas do transformador com derivação central,  $U_{S1}$  e  $U_{S2}$ , estão em oposição de fase e têm uma tensão de pico  $U_p = \sqrt{2} \times 10,4 = 14,7$  V. Durante o semiciclo positivo de  $U_{S1}$  o díodo D1 está a conduzir e o D2 ao corte; enquanto que durante o semiciclo positivo de  $U_{S2}$  o D2 está a conduzir e o D1 está ao corte. Assim, obtém-se a forma de onda da tensão rectificada  $U_{ret}$  (sem filtro), ilustrada na Figura 3.20b, com uma tensão de pico  $U_p - U_d$ , sendo  $U_d$  a queda de tensão no díodo D1 ou D2.

Como a componente AC de  $U_{ret}$  é muito grande foi utilizado um filtro, neste caso um condensador electrolítico (C1), para reduzir esse valor AC e consequentemente o ruído de *ripple*. Com a utilização de um condensador a componente AC de  $U_{ret}$  é menor, existindo contudo ainda uma tensão de *ripple* com um valor pico a pico  $U_{rip}$ . O valor de  $U_{rip}$  depende do condensador e da carga e pode ser estimado através das equações 3.2 e 3.3, em que  $I_c$  é a corrente consumida pela carga,  $f$  a frequência de  $U_{S1}$  ou de  $U_{S2}$ ,  $C$  a capacidade do condensador e  $U_o$  o valor médio de  $U_{ret}$  (com filtro).

$$U_{rip} = \frac{I_c}{2f \times C} \quad ; \quad U_o = (U_p - U_d) - \frac{U_{rip}}{2} \quad (\text{Eq. 3.2 e 3.3})$$

Neste caso, como o *ripple* não afecta muito a carga, uma vez que é utilizado um regulador de tensão, considerou-se um *ripple* de 2 V (aproximadamente 15 %). Assim sendo, considerando  $I_c = 0,047$  A,  $f = 50$  Hz e  $U_{rip} = 2$  V então o condensador utilizado na filtragem deve ter uma capacidade de

235  $\mu\text{F}$ . Como não existem condensadores com esta capacidade foi utilizado um condensador electrolítico com 220  $\mu\text{F}$  e, por isso,  $U_{\text{rip}} = 2,14 \text{ V}$  e  $U_o = 13,1 \text{ V}$ .

Assim, o regulador de tensão (U1), responsável por reduzir e estabilizar a tensão fornecida pelo circuito rectificador a um nível desejado (neste caso 5 V DC), tem que trabalhar com uma tensão de entrada de  $13,1 \pm 2,14 \text{ V DC}$  e produzir uma corrente de saída superior a 0,047 A. Com base nestes requisitos, foi utilizado o regulador de tensão LM78L05ACZ da National Semiconductor, ilustrado na Figura 3.21, que tem uma tensão de saída de 5 V DC, uma corrente de saída de 0,1 A e uma tensão de entrada entre 7 e 20 V DC.



Figura 3.21 Regulador de tensão LM78L05ACZ

No entanto, foi necessário analisar a temperatura de funcionamento do regulador e verificar que não é superior ao valor máximo de 125 °C. Como o regulador de tensão utilizado tem uma resistência térmica da junção para o ambiente ( $R_{tJA}$ ) de 230 °C/W a temperatura máxima de funcionamento do regulador de tensão ( $T_{\text{max}}$ ) é dada por:

$$T_{\text{max}} = R_{tJA} \times (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) \times I_{\text{out}} + 25^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Nota: considera-se uma temperatura ambiente de 25 °C

Como  $U_{\text{in}} = U_{\text{ret}} = 13,1 \text{ V}$ ,  $U_{\text{out}} = 5 \text{ V}$  e  $I_{\text{out}} = 0,047 \text{ A}$  então  $T_{\text{max}} = 112,6^{\circ}\text{C}$  e, por isso, não existe o risco de o regulador de tensão LM7805 aquecer demasiado e se queimar.

Os condensadores C2 e C3 utilizados à entrada e à saída do regulador de tensão limitam o ruído de alta frequência e devem ter um valor superior a 0,01  $\mu\text{F}$ . Neste caso, foram utilizados os seguintes condensadores:  $C2 = C3 = 0,1 \mu\text{F}$ .

### 3.3.6.2 Dispositivo de visualização de dados

O dispositivo de visualização de dados é alimentado por uma pilha de 9 V DC ou pela interface USB que disponibiliza uma tensão de alimentação de 5 V DC e corrente suficiente para alimentar o dispositivo. A Figura 3.22 ilustra a fonte de alimentação do dispositivo, que é constituída por uma pilha de 9 V DC e por um regulador de tensão (U2).



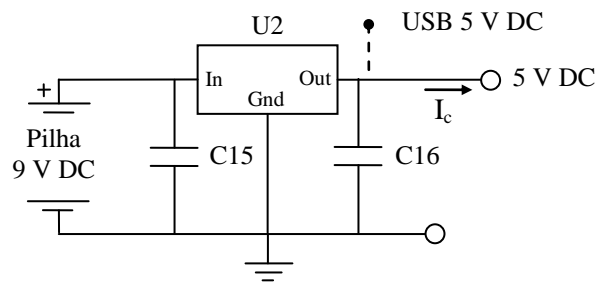


Figura 3.22 Circuito eléctrico da fonte de alimentação do dispositivo de visualização de dados

Tal como sucedido no dimensionamento da fonte de alimentação do dispositivo de aquisição de dados foi necessário, numa primeira fase, conhecer o consumo máximo do dispositivo de visualização de dados ( $I_c$ ) antes de escolher o regulador de tensão (U2). Os componentes electrónicos do dispositivo de visualização de dados que consomem energia são: o PIC18F2550, o módulo LCD, o ER400TRS, os LEDs e as resistências. Na tabela 3.2 são apresentadas as correntes máximas consumidas no dispositivo de visualização de dados

| Componente                  | $I_c$ (mA) |
|-----------------------------|------------|
| PIC18F2550                  | 30         |
| Visor LCD                   | 3,5        |
| ER400TRS                    | 23         |
| LEDs                        | 6,6        |
| Resistências <sup>(1)</sup> | 0,1        |
| Total                       | 63,2       |

<sup>(1)</sup> Resistências utilizadas no divisor resistivo à entrada de V0 do módulo LCD e no MCLR do PIC18F2550.

Tabela 3.2 Correntes máximas consumidas no dispositivo de visualização de dados

O regulador de tensão (U2) tem que trabalhar com uma tensão de entrada de 9 V DC e produzir uma corrente de saída superior a 0,064 A. O regulador de tensão LM78L05 pode funcionar nestas condições e, por isso, foi também utilizado na fonte de alimentação do dispositivo de visualização de dados.

Analisando a temperatura máxima de funcionamento ( $T_{max}$ ) do regulador de tensão (U2) verifica-se que não excede a temperatura máxima de 125 °C. Como  $U_{in} = 9$  V,  $U_{out} = 5$  V e  $I_{out} = 0,064$  A então  $T_{max} = 83,9$  °C.

Os condensadores C15 e C16 utilizados à entrada e à saída do regulador de tensão limitam o ruído de alta frequência e têm uma capacidade,  $C15 = C16 = 0,1$  µF.

### 3.3.7 Condicionamento de sinal

O ajuste dos sinais de tensão e de corrente lidos aos níveis exigidos pelo medidor de potência CS5463 foi realizado através de divisores de tensão resistivos e de filtros passa-baixo. As resistências dos divisores de tensão foram dimensionadas de modo a que as entradas do CS5463 tenham valores eficazes de tensão inferiores a 0,177 V. Os filtros passa-baixo são utilizados para eliminar o ruído de alta frequência. Segundo os requisitos do CS5463, o filtro do sinal de tensão deve ter uma frequência de corte superior a 14 kHz. A frequência de corte do filtro do sinal de corrente deve ser superior a 16 kHz.

No dimensionamento das resistências dos divisores de tensão foram tidos em consideração os valores máximos admitidos para os sinais de tensão e de corrente. O sensor de corrente, utilizado na leitura do sinal de corrente, produz uma tensão proporcional à corrente lida com um valor eficaz máximo de 0,217 V, equivalente a 65 A. O sinal de tensão é lido dos 230 V AC da rede eléctrica. Como a variação de tensão permitida na rede eléctrica, em condições normais de funcionamento, é  $\pm 10\%$  então o valor eficaz máximo da tensão é 253 V.

A Figura 3.23 ilustra o circuito eléctrico utilizado no condicionamento do sinal de corrente. As resistências R2 e R3 são utilizadas no divisor de tensão e a resistência R4 e o condensador C4 no filtro passa-baixo. O canal de corrente do CS5463 tem uma impedância de entrada ( $Z_i$ ) de 30 k $\Omega$  e, por isso, foi também utilizada no divisor de tensão juntamente com a resistência R4.

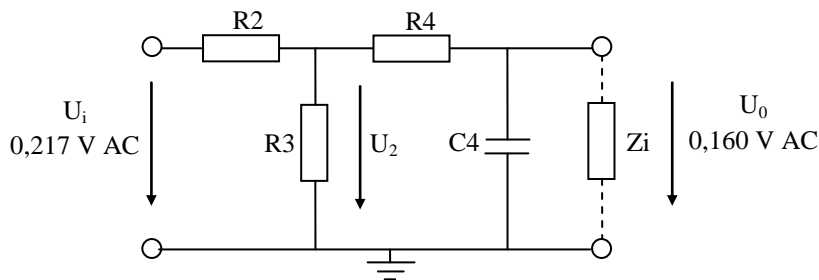


Figura 3.23 Condicionamento do sinal de corrente

A frequência de corte ( $f_{\text{corte}}$ ) do filtro passa-baixo do sinal de corrente foi calculada através da equação 3.5, em que R é o valor da resistência e C a capacidade do condensador:

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi \times R \times C} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

De modo a que  $f_{\text{corte}}$  seja superior a 16 kHz foram escolhidos  $R4 = 470\ \Omega$  e  $C4 = 18\ \text{nF}$ . Nestas condições, o filtro passa-baixo do sinal de corrente apresenta  $f_{\text{corte}} = 18,8\ \text{kHz}$ .

O divisor de tensão utilizado no condicionamento do sinal de corrente foi dimensionado tendo em conta que a entrada do canal de corrente do CS5463 tenha uma tensão com um valor eficaz máximo de 0,160 V. A relação entre a tensão proporcional ao sinal de corrente lido ( $U_i$ ) e a tensão de entrada do canal de corrente do CS5463 ( $U_0$ ) é dada pelas seguintes equações:

$$\frac{U_2}{U_i} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad ; \quad \frac{U_0}{U_2} = \frac{Z_i}{Z_i + R_4} \quad (\text{Eq. 3.6 e 3.7})$$

Sabendo que  $U_i = 0,217$  V,  $U_0 = 0,160$  V,  $R_4 = 470 \, \Omega$  e  $Z_i = 30 \, \text{k}\Omega$  consegue-se simplificar as equações 3.6 e 3.7 e obter a seguinte equação,  $R_2 = 0,335 \times R_3$ . A partir desta equação, considerando  $R_3 = 1 \, \text{k}\Omega$  resulta que  $R_2 = 335 \, \Omega$ . Devido à indisponibilidade desta resistência no mercado foi utilizada uma resistência  $R_2 = 316 \, \Omega$ . Deste modo, o valor eficaz máximo da tensão à entrada do canal de corrente do CS5463 é de 0,162 V.

O circuito eléctrico utilizado no condicionamento do sinal de tensão encontra-se ilustrado na Figura 3.24. Como a tensão é lida directamente da rede eléctrica, optou-se por utilizar um sinal diferencial como entrada do canal de tensão do CS5463. Deste modo, o ruído electromagnético da rede é reduzido. No entanto, é necessário utilizar um maior número de componentes no condicionamento de sinal. As resistências  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$  e  $R_8$  são utilizadas no divisor de tensão. Os componentes do filtro passa-baixo são as resistências  $R_9$  e  $R_{10}$  e os condensadores  $C_5$  e  $C_6$ .

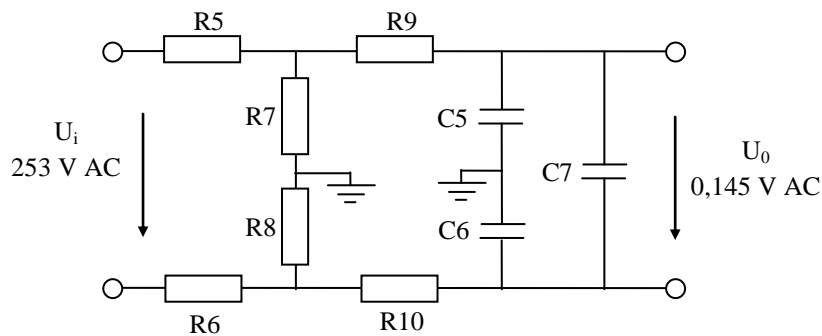


Figura 3.24 Condicionamento do sinal de tensão

A frequência de corte ( $f_{\text{corte}}$ ) do filtro passa-baixo do sinal de tensão foi calculada através da equação 3.5. Como  $f_{\text{corte}}$  deve ser superior a 14 kHz foram escolhidos,  $R_9 = R_{10} = 470 \, \Omega$  e  $C_5 = C_6 = 22 \, \text{nF}$ . Nestas condições, o filtro passa-baixo do sinal de tensão apresenta  $f_{\text{corte}} = 15,4 \, \text{kHz}$ . Como o sinal de tensão é diferencial, foi utilizado um condensador ( $C_7$ ) de 18 nF para eliminar o ruído diferencial.

Atendendo ao facto do sinal de tensão lido ser normalmente 230 V AC, não é importante que a gama de entrada do canal de tensão do CS5463 seja muito grande. Como tal, optou-se por um valor

eficaz máximo de 0,145 V na entrada do canal de tensão do CS5463. A impedância de entrada do canal de tensão do CS5463 é de 2 M $\Omega$  e, por isso, foi desprezada.

Como o sinal de tensão é diferencial então  $R5 = R6$  e  $R7 = R8$ . A tensão de entrada do canal de tensão do CS5463 ( $U_0$ ) e o sinal de tensão lido ( $U_i$ ) relacionam-se através da seguinte equação:

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{R7+R8}{R5+R6+R7+R8} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

No dimensionamento do divisor de tensão considerou-se  $R7 = R8 = 470 \Omega$ . Como  $U_i = 253 \text{ V}$  e  $U_0 = 0,145 \text{ V}$  segundo a equação 3.8 resulta que  $R5 = R6 = 820 \text{ k}\Omega$ .

### 3.3.8 Protecções

O dispositivo de aquisição de dados é alimentado a partir da rede eléctrica, tendo sido, por isso, necessário protegê-lo contra possíveis sobretensões, sobrecargas e ruído electromagnético. Na entrada do dispositivo foi instalado um varistor (RV), um disjuntor térmico (CB) e um filtro de linha (LF) (Figura 3.25).

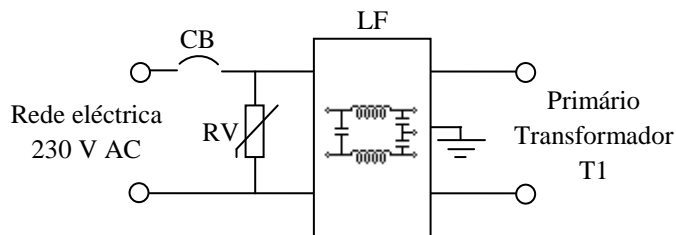


Figura 3.25 Circuito eléctrico das protecções do dispositivo de aquisição de dados

Estes componentes foram escolhidos tendo em conta que a tensão de funcionamento do dispositivo é de 230 V AC  $\pm 10 \%$  e que a corrente máxima é 0,047 A.

O varistor foi instalado entre a fase e o neutro da rede eléctrica e protege o dispositivo de aquisição de dados contra picos de tensão. Para proteger o dispositivo contra sobrecargas foi utilizado um disjuntor térmico com uma corrente nominal de 0,5 A. O filtro de linha, constituído por três condensadores, duas bobinas e uma resistência, foi utilizado para reduzir as interferências electromagnéticas introduzidas pela rede eléctrica. Na Figura 3.26 estão ilustrados os componentes utilizados na protecção do dispositivo de aquisição de dados.



Figura 3.26 Protecções do dispositivo de aquisição de dados

### 3.3.9 Comunicação

#### 3.3.9.1 SPI (PIC18F2420 ↔ CS5463)

A transmissão de dados e de comandos entre o medidor de potência (CS5463) e o microcontrolador (PIC18F2420) do dispositivo de aquisição de dados é efectuada através do protocolo de comunicação SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*).

O SPI caracteriza-se por ser uma ligação série síncrona que opera em modo *full duplex* (transmissão de dados simultaneamente nos dois sentidos). A comunicação baseia-se numa relação de mestre-escravo, sendo iniciada pelo mestre, que selecciona um dos escravos através do sinal SS (*Slave Select*). O mestre é também responsável por gerar um sinal de *clock* que é fornecido aos escravos através da linha de sincronização SCLK. A informação é transmitida nos dois sentidos, utilizando uma linha de transmissão de dados do mestre para o escravo (MOSI - *Master Out Slave In*) e uma do escravo para o mestre (MISO - *Master In Slave Out*).

Na Figura 3.27 são ilustradas as ligações SPI entre o PIC18F2420 e o CS5463. O PIC18F2420 é nesta comunicação o mestre, enquanto que o CS5463 é o escravo.

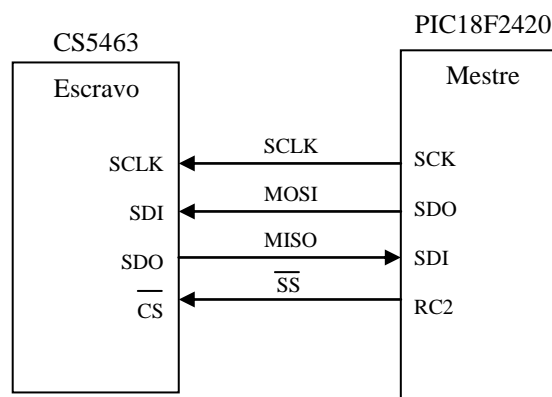


Figura 3.27 Ligação SPI entre o CS5463 e o PIC18F2420

O CS5463 interpreta comandos de 8 bits, de quatro tipos diferentes: instrução, sincronização, leitura de registo e escrita de registo. Os comandos de instrução são utilizados para iniciar a leitura dos

sinais de entrada e a medição dos dados de energia, para ligar/desligar o medidor e para o *reset*. Existem dois comandos de sincronização, SYNC0 e SYNC1, que são utilizados na inicialização da comunicação série e na necessidade de re-sincronização. Na escrita e leitura dos registos são utilizados os comandos de registo que contêm o endereço do registo que se pretende aceder e um bit de controlo para escrita (1) ou para leitura (0). O CS5463 possui diversos registos de 24 bits onde estão guardados os dados de configuração do medidor e os dados de energia medidos.

Uma transmissão de dados é sempre inicializada pelo envio do comando de 8 bits apropriado, sendo que o bit mais significativo (MSB) é transmitido em primeiro lugar. A pedido do PIC18F2420, o CS5463 envia os dados de energia e guarda os valores de calibração.

A Figura 3.28 ilustra a sequência necessária para escrever e ler os comandos e dados do CS5463. Os comandos que escrevem nos registos devem ser seguidos por três bytes de dados. Durante a leitura de dados, se não for enviado um novo comando, deve ser enviado um SYNC0 ou SYNC1. Os 3 bytes enviados pelo CS5463 são tratados e conjugados pelo PIC18F2420.

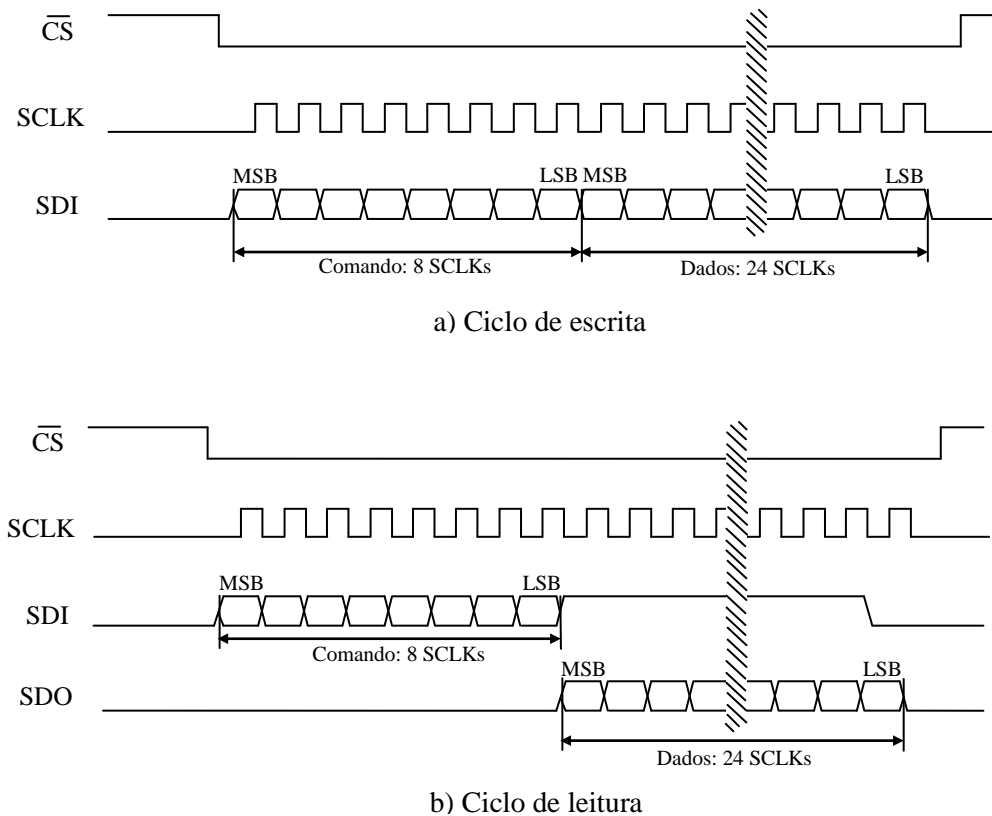


Figura 3.28 Sequência de escrita e de leitura dos comandos e dados do CS5463

Exemplo de leitura: se o objectivo for ler o valor da potência activa (registo  $P_{ACTIVE}$  com endereço “01010”), envia-se o comando “00010100” do PIC18F2420 para o CS5463, seguido de três SYNC0.

$\downarrow$   
 endereço  
 leitura

O CS5463 envia 3 bytes com o valor correspondente à potência activa para o PIC18F2420 que tem depois de conjugar e converter esses bytes para um valor decimal.

### 3.3.9.2 UART (PIC ↔ ER400TRS)

A transmissão de dados entre os transceptores sem fios (ER400TRS) e os microcontroladores (PIC18F2420 e PIC18F2550) é realizada através de comunicação UART (do inglês, *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*).

O UART é um módulo de comunicação série assíncrono cuja principal função é converter os dados entre o formato paralelo e o formato série. Desta forma, são apenas necessários dois fios na comunicação de dados. A cada byte de dados é adicionado um *start* bit, um *stop* bit e opcionalmente um bit de paridade. O tempo de duração de cada bit (que define a taxa de comunicação ou *baud rate*) deve ser configurado para que seja comum ao transmissor e ao receptor.

Os microcontroladores e os transceptores sem fios possuem um módulo UART interno, o que facilita a comunicação. A Figura 3.29 ilustra as ligações utilizadas na comunicação UART entre os microcontroladores PIC18 e os transceptores sem fios ER400TRS.

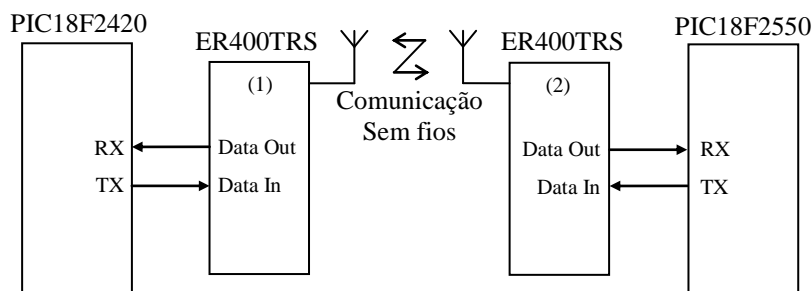


Figura 3.29 Ligações utilizadas na comunicação UART entre os PICs e os ER400TRS

Os microcontroladores e os transceptores sem fios foram configurados de forma a comunicarem com uma *baud rate* de 19200 Baud. Os dados são transmitidos no padrão RS232 e não existe nenhuma restrição nos caracteres que podem ser enviados (valor hexadecimal 00 – FF). Na Figura 3.30 está ilustrada a sequência do envio de dados entre o PIC18F2420 e o PIC18F2550.

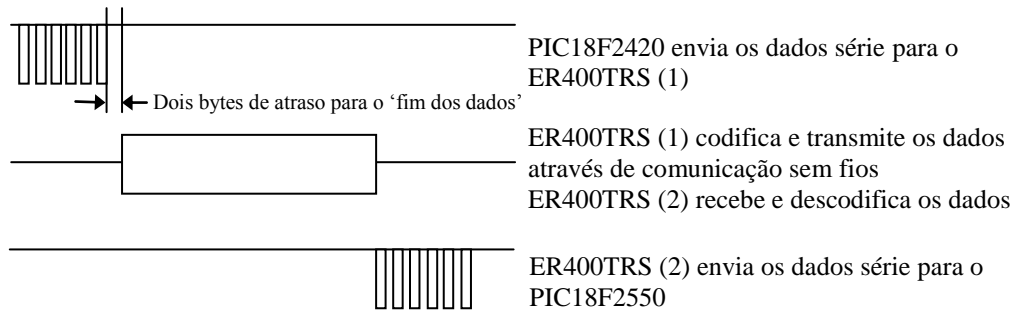


Figura 3.30 Sequência de envio de dados entre o PIC18F2420 e o PIC18F2550

O PIC18F2420 envia os dados no formato série para o ER400TRS (1). Os dados são transmitidos para o *buffer* interno do transceptor de forma contínua e na *baud rate* escolhida até que o *buffer* esteja cheio ou até que um atraso de dois bytes seja detectado. O tamanho do *buffer* interno de cada ER400TRS é limitado a 128 bytes. Depois de detectar um “fim de dados” ou um “*buffer* cheio” o controlador do ER400TRS (1) inicializa a transmissão RF e envia os dados que estão no *buffer* usando codificação Manchester. O ER400TRS (2), se estiver dentro do alcance de transmissão, descodifica e coloca os dados recebidos no seu *buffer*. Depois de verificar a integridade dos dados, o ER400TRS (2) envia os dados do seu *buffer* para o PIC18F2550 na *baud rate* escolhida.

Como na comunicação sem fios não existe *handshaking*<sup>2</sup> existe, necessariamente, um intervalo de tempo entre a conclusão de uma transmissão e uma recepção de dados. O tempo de transmissão por byte ( $T_{tr}$ ) dos ER400TRS utilizados é expresso na seguinte equação:

$$T_{tr} = 13,2 + (n \text{ bytes} \times 0,8) \text{ (ms)} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

A utilização de transceptores sem fios garante uma maior segurança na comunicação de dados. Depois da recepção de dados é enviado um *acknowledge* para o transmissor, indicando que os dados foram recebidos com sucesso.

Para que os dois microcontroladores troquem dados correctamente foi necessário definir uma estrutura de mensagens. A Figura 3.31 ilustra o formato da mensagem utilizada na comunicação UART entre os dois microcontroladores PIC.

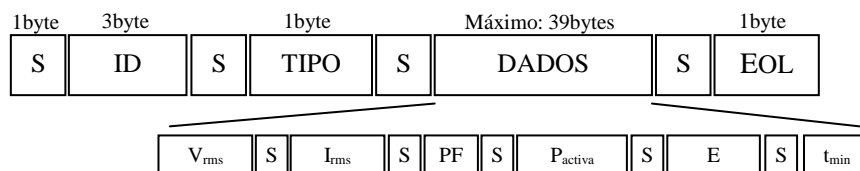


Figura 3.31 Formato da mensagem utilizada na comunicação entre os PICs

<sup>2</sup> *Handshaking* é o processo de negociação automático entre o transmissor e o receptor relativo aos parâmetros de comunicação.



A mensagem é composta por cinco elementos diferentes, descritos na Tabela 3.3.

| <u>Elemento</u> | <u>Descrição</u>  |
|-----------------|---|
| ID              | Identificador da mensagem                               |
| TIPO            | Tipo de mensagem  |
| DADOS           | Dados de energia  |
| S               | Carácter que separa os elementos existentes na mensagem |
| EOL             | Identificador do final da mensagem                      |

Tabela 3.3 Descrição dos elementos da mensagem utilizada na comunicação entre os PICs

O elemento DADOS contém os dados de energia medidos e calculados pelo dispositivo de aquisição, nomeadamente o valor eficaz da tensão ( $V_{rms}$ ), o valor eficaz da corrente ( $I_{rms}$ ), o factor de potência (PF), a potência activa ( $P_{activa}$ ), a energia consumida (E) e o tempo de medição de dados em minutos ( $t_{min}$ ).

O elemento TIPO identifica não só o tipo de mensagem como o tipo de acção. A Tabela 3.4 mostra os diferentes tipos de mensagem existentes.

| <u>Tipo</u> | <u>Descrição</u>  |
|-------------|---|
| I           | Pedido de inicialização da medição dos dados                      |
| F           | Pedido de finalização da medição dos dados                        |
| C           | Pedido de calibração do CS5463 (ou fim do processo de calibração) |
| D           | Dados de energia recebidos  |
| A           | <i>Acknowledge</i> recebido                                       |

Tabela 3.4 Tipos de mensagem utilizada na comunicação entre os PICs

O tamanho máximo da mensagem é de 48 bytes (39 bytes de dados) demorando, por isso, uma mensagem com esta dimensão 51,6 ms a ser transmitida entre os dois ER400TRS.

### 3.3.9.3 USB (PIC18F2550 ↔ PC)

A transmissão de dados entre o microcontrolador PIC18F2550 do dispositivo de visualização de dados e o computador é realizada através do protocolo de comunicação USB (do inglês, *Universal Serial Bus*).

A utilização da porta USB do computador tem como vantagem uma maior universalidade, uma vez que o dispositivo pode ser utilizado nos computadores mais recentes que não tenham porta série. Para além disso, a interface USB disponibiliza uma tensão de alimentação de 5V DC com corrente suficiente para o dispositivo. Assim, enquanto se está a guardar os dados de energia no computador, a bateria do dispositivo de visualização de dados não está a ser utilizada.

O transceptor interno do módulo SIE do microcontrolador PIC18F2550 é utilizado para comunicação USB. O PIC18F2550 utiliza o padrão USB 1.1 e uma velocidade de transmissão de 1,5 Mbps. A Figura 3.32 ilustra as ligações entre o PIC18F2550 e o socket USB utilizado na comunicação com o computador. São apenas necessários dois fios condutores para a comunicação de dados com o computador (D+ e D-).

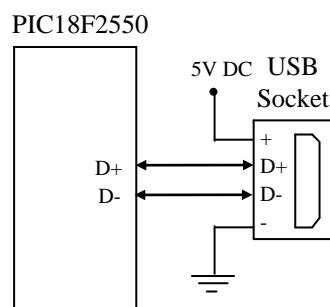


Figura 3.32 Ligação USB entre o PIC18F2550 e o socket USB

O PIC18F2550 depois de receber um comando do computador pedindo o envio dos dados, remete uma mensagem com os dados de energia para o computador. Na Figura 3.33 está ilustrado o formato das mensagens utilizadas na comunicação entre dispositivo de visualização de dados e o computador.

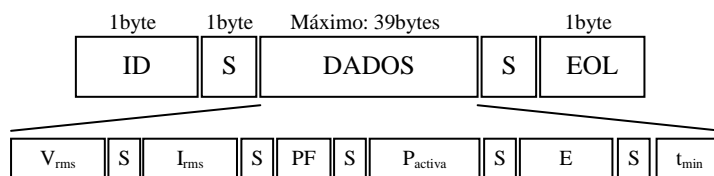


Figura 3.33 Formato de mensagem utilizada na comunicação entre o dispositivo de visualização de dados e o computador

A estrutura desta mensagem é muito semelhante à utilizada na comunicação UART entre os dois dispositivos. É composta por um ID, que identifica a mensagem, o elemento DADOS que contém os dados de energia medidos e enviados pelo dispositivo de aquisição, o EOL que indica o fim da mensagem e o S que separa os elementos existentes na mensagem.

O tamanho máximo da mensagem é de 43 bytes (ou seja, 344 bits) demorando, por isso, uma mensagem com esta dimensão 229 ms a ser transmitida entre o dispositivo e o computador dado que a velocidade de transmissão é de 1,5 Mbps.

### 3.4 Firmware

A *firmware* dos microcontroladores PIC18 foi desenvolvida em linguagem C, com a ajuda do compilador MPLAB C18 versão 3.33 da Microchip.

Cada microcontrolador é responsável por executar diversas tarefas. Para tornar o processamento de todas as tarefas mais rápido e eficiente foram utilizadas as interrupções dos PICs. As interrupções permitem que durante a execução de uma determinada tarefa, o processador do PIC fique disponível para executar uma ISR (do inglês, *Interrupt Service Routine*) promovida pela interrupção gerada. A ISR executa diversas acções em resposta a uma interrupção. Esta funcionalidade é muito importante na medida em que o sistema implementado deve tratar muita informação em tempo real.

A *firmware* desenvolvida para cada um dos microcontroladores (PIC18F2420 e PIC18F2550) é composta essencialmente por uma rotina principal e pelas ISR das diferentes interrupções.

As rotinas principais dos dois PICs são muito semelhantes e podem ser descritas pelo mesmo fluxograma, ilustrado na Figura 3.34. Esta rotina é responsável por inicializar e configurar os periféricos, as interrupções e as variáveis de controlo do programa. No entanto, é importante referir que cada microcontrolador utiliza periféricos, interrupções e variáveis de controlo diferentes.

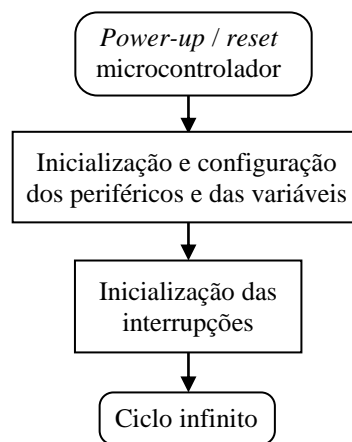


Figura 3.34 Fluxograma da rotina principal dos microcontroladores

Cada microcontrolador, depois de ser alimentado (*power-up*) ou de sofrer um *reset* externo, inicializa e configura os seus periféricos e as diferentes variáveis de controlo da *firmware*. Para definir o estado de acção em que o microcontrolador se encontra é utilizada uma variável designada "Action".

De seguida, são inicializadas as interrupções do microcontrolador. Cada interrupção é programada individualmente para um de dois níveis de prioridade: alta (1) ou baixa (0). No caso das interrupções dos *Timers* são ainda ajustados os registos TMR, para definir o período da interrupção. Através da equação 3.10 é possível configurar os *Timers* e definir o tempo que a interrupção demora a ser gerada ( $T_{out}$ ).

$$T_{out} = \left( \frac{f_{osc}}{prescaler \times (TMR_f - TMR_i)} \right)^{-1} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

O registo TMR é incrementado de acordo com o sinal do oscilador externo ou interno utilizado ( $f_{osc}$ ). Se o sinal de oscilação resultar de um oscilador interno,  $f_{osc}$  deve ainda ser dividida por 4. A diferença  $TMR_f - TMR_i$  representa o número de vezes que o registo TMR é incrementado, sendo  $TMR_f$  o valor final e  $TMR_i$  o valor inicial escolhido. Pode ainda ser utilizado o divisor do registo (*prescaler*) para se obter o  $T_{out}$  desejado.

Por último, é realizado um ciclo infinito para não “adormecer” o processador, visto que as interrupções não o “acordam”. Desta forma, o processador do PIC sai periodicamente do ciclo para executar as ISR.

De seguida são apresentadas as principais rotinas executadas por cada um dos microcontroladores PIC.

### 3.4.1 PIC18F2420

O microcontrolador PIC18F2420 do dispositivo de aquisição de dados foi programado para responder a duas interrupções, apresentadas na Tabela 3.5.

| <u>Interrupção</u>            | <u>Função</u>  | <u>Prioridade</u> |
|-------------------------------|--|-------------------|
| Receptor UART                 | - Detectar a recepção de mensagens enviadas pelo dispositivo de visualização de dados  | 1                 |
| Timer 1<br>( $T_{out}$ : 1 s) | - Ler os registos do CS5463 onde estão guardados os dados de energia;<br>- Calcular a energia consumida;<br>- Enviar os dados para o dispositivo de visualização de dados. | 0                 |

Tabela 3.5 Interrupções utilizadas pelo PIC18F2420

A interrupção do Timer 1 tem baixa prioridade enquanto que a interrupção do receptor UART foi programada com alta prioridade. Esta escolha prende-se com a possibilidade das mensagens serem recebidas a qualquer instante. De modo a não existir perda de dados, a ISR do Timer 1 é suspensa automaticamente quando uma interrupção do receptor UART é detectada e só é retomada depois da ISR do receptor UART ser concluída.

Como já anteriormente referido, a variável “Action” foi criada para indicar o actual estado de acção em que o microcontrolador se encontra. A Tabela 3.6 mostra os quatro possíveis estados do PIC18F2420.

| <u>Estado</u> | <u>Descrição</u>   |
|---------------|--|
| 0             | Sem qualquer acção (estado inicial)  |
| 1             | A comunicar com o CS5463, a calcular a energia e a enviar os dados para o dispositivo de visualização de dados |
| 2             | A comunicar com o CS5463 e a calcular a energia  |
| 3             | A calibrar o CS5463  |

Tabela 3.6 Estados de acção do PIC18F2420

### 3.4.1.1 ISR do receptor da interface UART

Depois de ocorrer um pedido de interrupção gerado pelo receptor da interface UART é executada uma rotina que identifica o tipo de mensagem recebida e executa uma determinada acção. Na Figura 3.35 está ilustrado o fluxograma da ISR do receptor da interface UART.

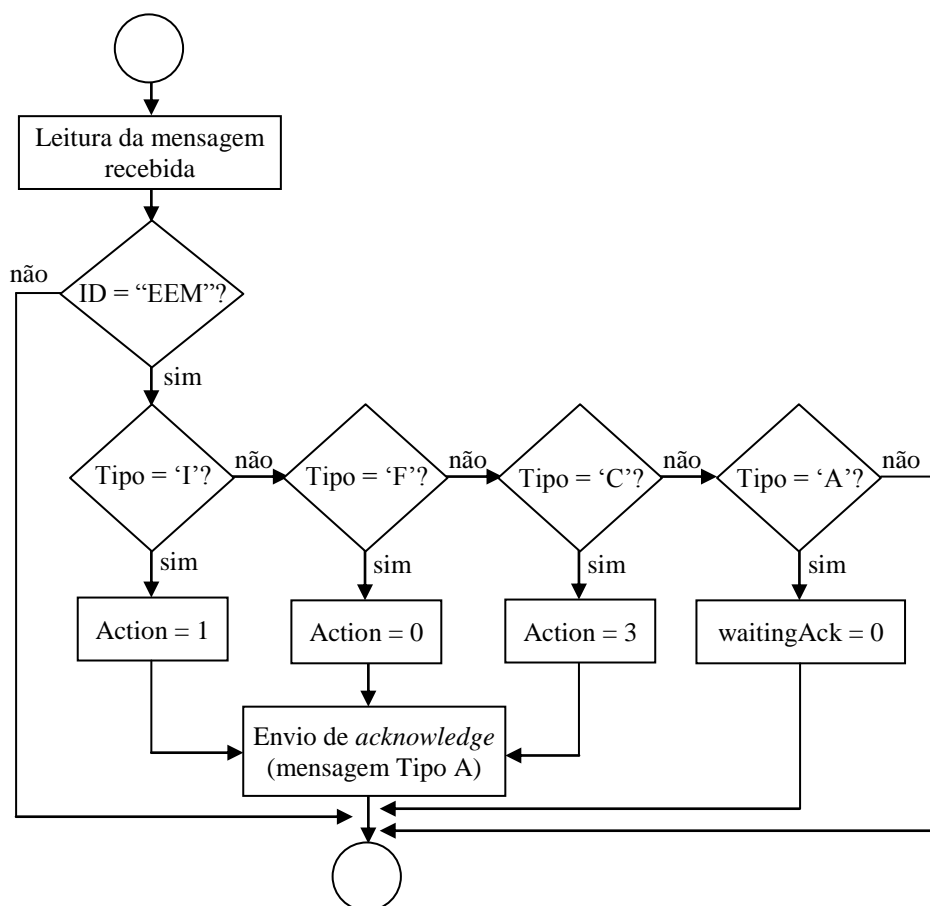


Figura 3.35 Fluxograma da ISR do receptor da interface UART do PIC18F2420

Depois de ler a mensagem recebida, o PIC verifica se o ID corresponde ao utilizado pelo sistema implementado. Neste caso, o ID tem 3 bytes e deve ser igual a “EEM” (do inglês, *Electric Energy Monitor*). O ID foi criado para evitar que mensagens enviadas por outros sistemas sejam tratadas pelo PIC18F2420.

Após validação do ID é verificado o tipo de mensagem recebida, para saber que acção deve o PIC18F2420 tomar. Podem ser recebidos quatro tipos de mensagens: I, F, C e A, cujo significado é explicado no capítulo 3.3.9.2.

Se a mensagem recebida for do tipo I, F ou C, após ser executada a devida acção, é enviado um *acknowledge* para o dispositivo de visualização de dados indicando que a mensagem foi recebida com sucesso. Caso a mensagem recebida seja do tipo A, significa que foi recebido um *acknowledge*. Para controlar a recepção deste tipo de mensagem foi criada uma variável “waitingAck”, que tem o valor 1 se estiver à espera de um *acknowledge* ou 0 caso contrário.

### 3.4.1.2 ISR do Timer 1

O Timer 1 foi configurado para que ocorra uma interrupção num período de um segundo ( $T_{out} = 1$  s). Foi assim necessário configurar o registo TMR1 de 16 bits ( $TMR_f = 65536$ ) através da equação 3.10. Como o Timer 1 utiliza um cristal de 32,768 kHz como oscilador externo ( $f_{osc}$ ) e prescaler = 1, então o registo TMR1 deve ter um valor inicial igual a 32768 para que  $T_{out} = 1$  s.

O registo TMR1 é assim configurado com um valor inicial de 32768 que é incrementado a cada pulso do oscilador de 32,768 kHz. Quando o contador chega a 65536, o próximo pulso gera um *overflow* sendo gerada a interrupção do Timer 1.

A Figura 3.36 ilustra o fluxograma da ISR do Timer 1. Quando a interrupção do Timer 1 é gerada a ISR verifica o estado de acção em que o PIC18F2420 se encontra. Se a variável de estado “Action” for 1 ou 2, o PIC comunica com o CS5463 e lê os registos que contêm os dados de energia (valores eficazes de tensão e de corrente, factor de potência e potência activa). Cada um destes dados é guardado num registo de 3 bytes, pelo que é necessário convertê-los para valores decimais. No capítulo 3.4.1.4 é explicado o processo de conversão realizado.

De seguida é feito o cálculo da energia consumida, em função da potência activa medida pelo CS5463. Esta rotina é descrita com mais detalhe no capítulo 3.4.1.3.

Após o cálculo da energia, é realizada a verificação da situação de não recepção de *acknowledge*. Se o PIC18F2420 estiver à espera de um *acknowledge* durante mais de cinco segundos (cinco interrupções do Timer 1) a variável de estado “Action” passa a ser igual a 2. Desta forma, quando o dispositivo de visualização é desligado, o dispositivo de aquisição deixa de enviar mensagens continuando, no entanto, a comunicar com o CS5463 e a calcular a energia.

Por último, é analisado se o PIC deve ou não enviar a mensagem com os dados para o dispositivo de visualização. Se a variável de estado “Action” for igual a 1, os dados são convertidos no formato de mensagem descrito no capítulo 3.3.9.2 e são enviados através da interface UART. Depois do envio, a variável “waitingAck” passa a ter o valor 1, indicando que é esperado um *acknowledge* do dispositivo de visualização de dados.

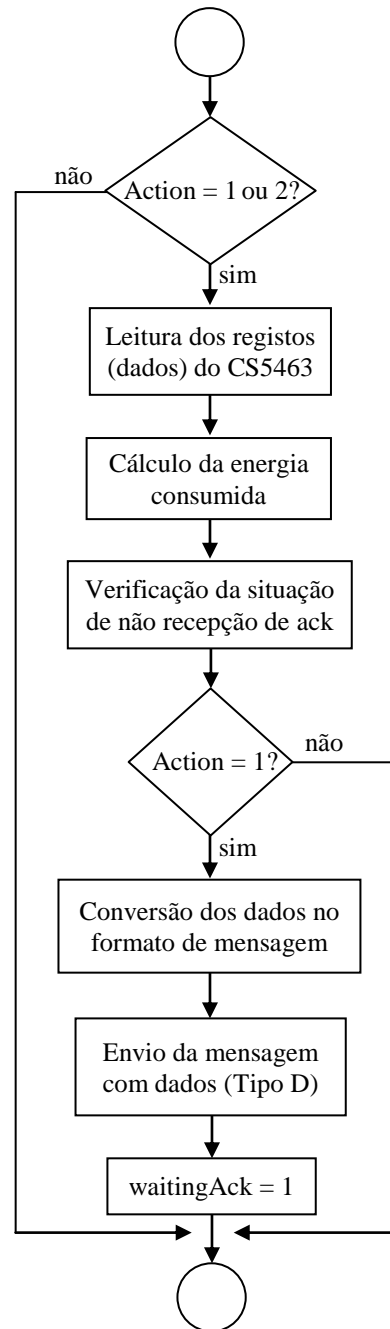


Figura 3.36 Fluxograma da ISR do Timer 1 do PIC18F2420

#### 3.4.1.3 Cálculo da energia consumida

Para que o utilizador tenha uma percepção clara do seu consumo de energia, optou-se por calcular a média da energia consumida por hora. Se o tempo de medição de dados for inferior a uma hora é realizada uma previsão baseada na média efectuada.

O cálculo da média da energia consumida permite ter um único referencial, o consumo por hora. Assim o utilizador pode fazer estimativas do seu consumo horário desde o início da medição de dados. A média da energia consumida por hora é representada em kWh, uma vez que esta é a unidade

de energia utilizada pelas empresas de electricidade e a que consta na factura mensal de electricidade. Assim, os utilizadores estão perante uma unidade de energia que é do seu conhecimento, o kWh.

A rotina criada para calcular a média da energia consumida por hora é descrita no fluxograma ilustrado na Figura 3.37. Esta rotina é executada a cada segundo e vai acumulando numa variável a energia em joules, obtida a partir do valor de potência activa medido pelo CS5463 em cada instante ( $P_{\text{activa}}$ ). A cada minuto, é realizado o cálculo da média da energia consumida por hora ( $E_{\text{horaria}}$ ) em função da energia acumulada e do tempo de medição de dados em minutos. O factor 1/3600 é utilizado para converter a energia de joules para Wh e o factor 1/1000 de Wh para kWh. As variáveis auxiliares utilizadas nesta rotina são inicializadas a zero na rotina principal e o seu significado é descrito na Tabela 3.7.

| <u>Variável</u> | <u>Descrição</u>                     |
|-----------------|--------------------------------------|
| Seg             | Contador de segundos                 |
| Min             | Tempo de medição de dados em minutos |
| A               | Energia acumulada em joules          |

Tabela 3.7 Variáveis auxiliares utilizadas no cálculo da média da energia consumida por hora

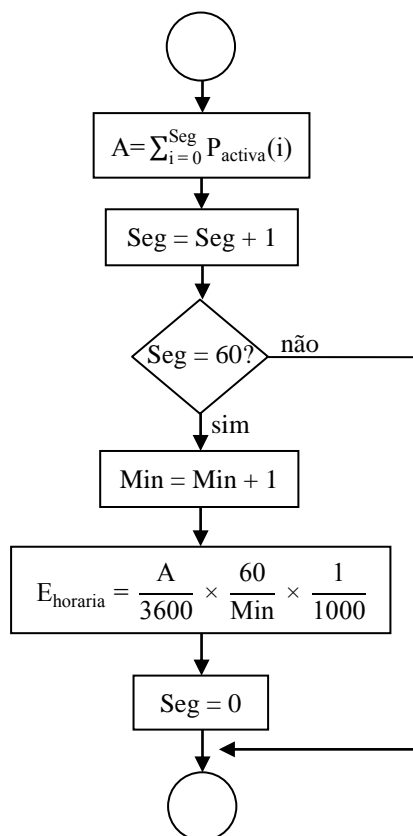


Figura 3.37 Fluxograma da rotina utilizada no cálculo da média da energia consumida por hora



## 3.4.1.4 Processo de conversão dos dados

Cada dado medido pelo CS5463 é guardado sobre a forma de um registo de 3 bytes, tendo sido, por isso, necessário converter cada valor de 3 bytes para o valor decimal correspondente. Assim são calculados os dados reais medidos pelo dispositivo de aquisição de dados. A Tabela 3.8 mostra as diferentes conversões realizadas.

| Grandeza     | Registo                  | Factor de conversão   | Conversão  |
|--------------|--------------------------|---|--|
| $V_{rms}$    | $R_{Vrms} \in [0,1]$     | $F_{Vrms} = \frac{R5 + R6 + R7 + R8}{R7 + R8}$                                    | $V_{rms} = \frac{R_{Vrms}}{FFFFFFh} \times 0,25 \times F_{Vrms}$             |
| $I_{rms}$    | $R_{Irms} \in [0,1]$     | $F_{Irms} = \frac{Zi + R4}{Zi} \times \frac{R2 + R3}{R3} \times \frac{3100}{R_b}$ | $I_{rms} = \frac{R_{Irms}}{FFFFFFh} \times 0,25 \times F_{Irms}$             |
| PF           | $R_{PF} \in [-1,1]$      | -   | $PF = \frac{R_{PF}}{7FFFFFFh}$   |
| $P_{activa}$ | $R_{Pactiva} \in [-1,1]$ | $F_{Pactiva} = F_{Vrms} \times F_{Irms}$  | $P_{activa} = \frac{R_{Pactiva}}{7FFFFFFh} \times 0,25^2 \times F_{Pactiva}$ |

Tabela 3.8 Factores de conversão dos dados medidos pelo CS5463

Os registos de 3 bytes que guardam os dados medidos pelo CS5463 podem ser representados por valores entre 0 e 1 (*unsigned registers*) ou por valores entre -1 e 1 (*signed registers*). Cada um destes valores representa a percentagem do valor máximo possível.

Para os valores de tensão ou de corrente, incluindo os seus valores eficazes, o valor máximo possível é 0,25 V (0,5 V pico a pico). Como tal, os valores dos registos de 3 bytes que guardam o valor eficaz da tensão e da corrente ( $R_{Vrms}$  e  $R_{Irms}$ ) foram multiplicados por 0,25.

Os registos que guardam o factor de potência e a potência activa são representados por valores entre -1 e 1. No entanto, optou-se por converter os valores dos registos por forma a que a gama de valores se situe entre 0 e 1, facilitando cálculos futuros. Foi assim necessário realizar a seguinte operação, em que R é o valor do registo e R' o novo valor do registo:

$$\text{Se } (R > 7FFFFFFh) \text{ então } R' = FFFFFFFh - R$$

Para o valor do factor de potência não é necessário fazer qualquer conversão adicional, visto ter um valor entre 0 e 1, tal como o seu registo. Relativamente à potência activa, e uma vez que é calculada a partir dos valores de tensão ou de corrente, o valor máximo possível do seu registo será  $0,25 \times 0,25$ .

Por último, para saber qual o valor real de cada grandeza foi ainda necessário aplicar um factor de conversão dado pela relação de resistências utilizadas no condicionamento de sinal. O factor de conversão do sinal de corrente depende ainda da relação de transformação do transformador de corrente e da resistência de *burden* utilizada no secundário do transformador.

### 3.4.1.5 Rotina de calibração do CS5463

O processo de calibração do medidor de potência CS5463 é realizado de forma a compensar os valores de *offset* dos canais de entrada de tensão e de corrente. Na Figura 3.38 está ilustrado o fluxograma da rotina de calibração do CS5463.

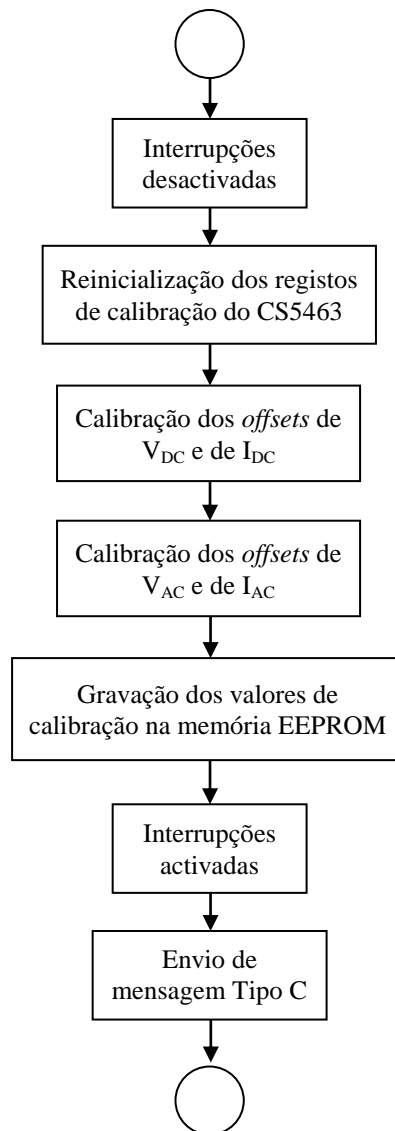


Figura 3.38 Fluxograma da rotina de calibração do CS5463

Durante a calibração do CS5463 as interrupções do PIC18F2420 são desactivadas uma vez que a calibração é um processo sensível. Além disso, durante a gravação de dados na memória EEPROM, é desaconselhável a ocorrência de interrupções.

O CS5463 tem quatro registos onde são guardados os valores de calibração dos canais de tensão e de corrente: dois para os *offsets* DC ( $V_{DC}$  e  $I_{DC}$ ) e outros dois para os *offsets* AC ( $V_{AC}$  e  $I_{AC}$ ). Como os canais de tensão e de corrente do CS5463 têm registos de *offset* independentes, a compensação de cada canal pode ser realizada separadamente sem que os resultados de calibração de

um canal afectem o outro. Os valores de calibração, depois de medidos, são subtraídos aos valores dos registos correspondentes.

Antes da compensação dos *offsets*, é necessário reinicializar os registos a zero. Depois do processo de calibração, os valores dos registos *offset* são guardados na memória EEPROM interna do PIC. Deste modo, não é necessário calibrar o CS5463 sempre que o microcontrolador deixa de ser alimentado. A Tabela 3.9 mostra os endereços da memória EEPROM onde são guardados os valores dos registos *offset*.

| <u>Endereço</u> | <u>Dados</u>                          |
|-----------------|---------------------------------------|
| 00h - 02h       | <i>Offset</i> DC do canal de tensão   |
| 03h - 05h       | <i>Offset</i> DC do canal de corrente |
| 06h - 08h       | <i>Offset</i> AC do canal de tensão   |
| 09h - 0Bh       | <i>Offset</i> AC do canal de corrente |

Tabela 3.9 Endereços de memória EEPROM utilizados pelo PIC18F2420

No final do processo de calibração é enviada uma mensagem do tipo C para o dispositivo de visualização de dados informando que a calibração foi realizada com sucesso.

### 3.4.2 PIC18F2550

O microcontrolador PIC18F2550 do dispositivo de visualização de dados foi programado para responder às interrupções apresentadas na Tabela 3.10.

| <u>Interrupção</u>               | <u>Função</u>  | <u>Prioridade</u> |
|----------------------------------|--|-------------------|
| Receptor UART                    | - Detectar a recepção de dados enviados pelo dispositivo de aquisição de dados | 1                 |
| Timer 0<br>( $T_{out}$ : 1 s)    | - Actualizar a informação mostrada no visor LCD                                | 0                 |
| Timer 1<br>( $T_{out}$ : 0,1 s)  | - Indicar que o tempo de recepção de <i>acknowledge</i> foi excedido           | 0                 |
| Timer 2<br>( $T_{out}$ : 0,82 s) | - Controlar o <i>bounce</i> dos botões   | 0                 |
| Porto B                          | - Detectar uma mudança na entrada dos pinos RB4 - RB7                          | 0                 |
| Interface USB                    | - Controlar a transmissão de dados através da interface USB                    | 1                 |

Tabela 3.10 Interrupções utilizadas pelo PIC18F2550

Tal como a interrupção do receptor UART, também a interrupção da interface USB tem alta prioridade uma vez que pode ocorrer uma ligação ou transmissão de dados pela porta USB a qualquer instante. As restantes interrupções foram programadas com baixa prioridade.

Os possíveis estados de acção do PIC18F2550, definidos pela variável “Action”, são apresentados na Tabela 3.11.

| <u>Número</u> | <u>Descrição</u>  |
|---------------|---|
| 0             | Sem qualquer acção (estado inicial)   |
| 1             | A receber os dados do dispositivo de aquisição de dados e comunicação USB permitida |
| 2             | CS5463 a ser calibrado  |

Tabela 3.11 Estados de acção do PIC18F2550

#### 3.4.2.1 ISR do receptor da interface UART

Na Figura 3.39 está ilustrado o fluxograma da ISR do receptor da interface UART do PIC18F2550.

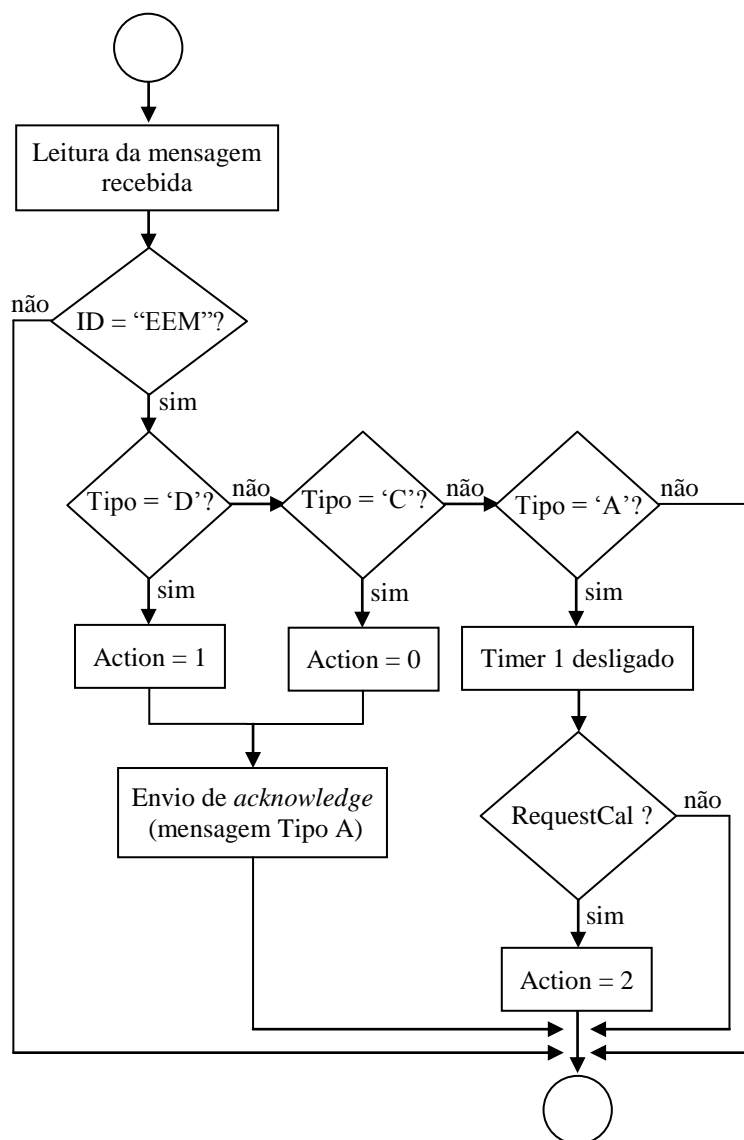


Figura 3.39 Fluxograma da ISR do receptor da interface UART do PIC18F2550

Depois de ler a mensagem recebida é validado o ID e verificado o tipo de mensagem para saber que acção deve o PIC18F2550 tomar. Podem ser recebidos três tipos de mensagens: D, C e A, cujo significado é descrito no capítulo 3.3.9.2.

Se a mensagem recebida for do tipo D ou C é executada a devida acção e é enviado um *acknowledge* para o dispositivo de aquisição de dados indicando que a mensagem foi recebida com sucesso. Caso a mensagem recebida seja do tipo A, significa que foi recebido um *acknowledge*. O Timer 1 utilizado para contar o tempo de recepção de *acknowledge* é desligado. Depois é verificado se o *acknowledge* recebido é uma resposta a um pedido de calibração enviado pelo dispositivo de visualização de dados. Se a variável “RequestCal” for igual a 1 significa que o PIC18F2550 enviou uma mensagem do tipo C e se encontra à espera de um *acknowledge*.

#### 3.4.2.2 ISR do Timer 0

A ISR do Timer 0 é responsável por actualizar os dados de energia mostrados no visor LCD e por verificar o tempo de não recepção desses dados.

O registo TMR0 de 16 bits foi configurado, através da equação 3.10, para que a interrupção do Timer 0 ocorra num período de um segundo ( $T_{out} = 1$  s). Como  $f_{osc} = 20\text{MHz}$  e prescaler = 128 então o registo TMR0 deve ter o valor inicial de 26474, para que  $T_{out} = 1$  s.

A Figura 3.40 ilustra o fluxograma da ISR do Timer 0 do PIC18F2550. Se o PIC estiver a receber os dados de energia do dispositivo de aquisição (“Action” = 1) verifica se deve ou não actualizar os dados no visor LCD. A variável “showMeasures” é utilizada para este fim.

Se o PIC18F2550 estiver 8 segundos sem receber os dados do dispositivo de aquisição significa que ocorreu um problema na comunicação e, por isso, existe uma alteração no estado de acção do microcontrolador. Como a interrupção do Timer 0 ocorre num período de 1 s foi necessário criar uma variável (cT0) para contar o número de interrupções. Sempre que o PIC recebe dados de energia do dispositivo de aquisição a variável cT0 é inicializada a zero. Quando  $cT0 = 8$  significa que passaram 8 segundos e, como tal, ocorreu uma falha na comunicação.

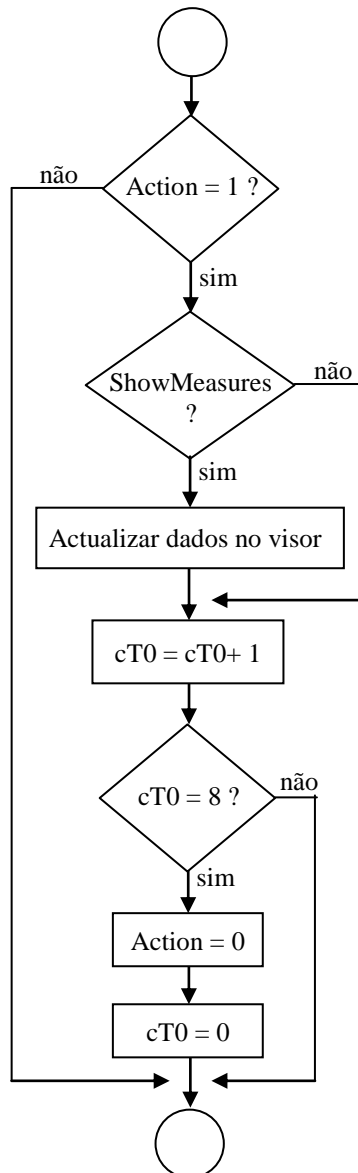


Figura 3.40 Fluxograma da ISR do Timer 0 do PIC18F2550

#### 3.4.2.3 ISR do Timer 1

A ISR do Timer 1 é utilizada para verificar se o tempo de recepção de um *acknowledge* é excedido. Sempre que uma mensagem é enviada pelo PIC18F2550 o Timer 1 é ligado e quando um *acknowledge* é recebido o Timer 1 é desligado. O tempo de espera de recepção de *acknowledge* escolhido foi de 5 segundos.

No entanto, como o Timer 1 utiliza a frequência interna de oscilação do PIC18F2550 ( $f_{osc} = 20$  MHz) não é possível obter interrupções em períodos de 5 segundos. Através da equação 3.10, foi apenas possível obter  $T_{out} = 0,1$  s com  $f_{osc} = 20$  MHz, prescaler = 8 e  $TMR1_i = 3036$ . Como a interrupção do Timer 1 ocorre num período de 0,1s foi necessário criar uma variável (cT1) para contar o número de interrupções. Assim quando  $cT1 = 50$  significa que decorreram 5 segundos.

A Figura 3.41 ilustra o fluxograma da ISR do Timer 1 do PIC18F2550.

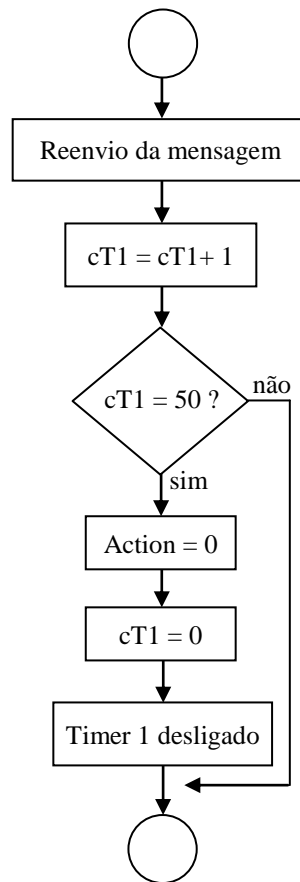


Figura 3.41 Fluxograma da ISR do Timer 1 do PIC18F2550

Enquanto o PIC18F2550 não receber um *acknowledge* da mensagem enviada, reenvia a mensagem a cada segundo. Este período tem em conta o tempo máximo de envio de uma mensagem pelos transceptores ER400TRS, aproximadamente 50 ms.

Quando  $cT1 = 50$ , ou seja, passados 5 segundos sem recepção de *acknowledge*, significa que ocorreu um erro na comunicação sem fios entre os dois dispositivos. O estado de acção do PIC18F2550 é alterado, a variável  $cT1$  reinicializada a zero e o Timer 1 desligado.

#### 3.4.2.4 ISRs do porto B e do Timer 2

O controlo do estado dos botões de pressão é realizado através de duas interrupções: a do porto B e a do Timer 2 do microcontrolador. A Figura 3.42 ilustra os fluxogramas das ISRs destas duas interrupções.

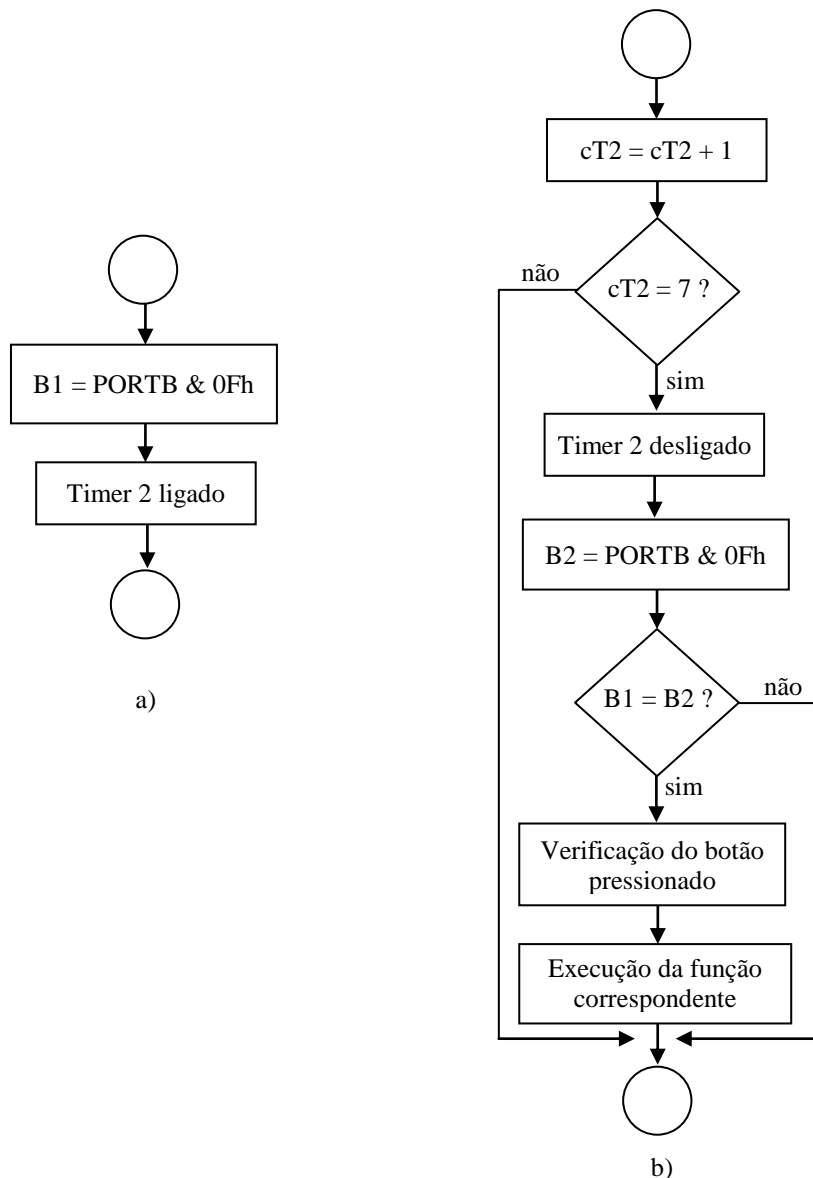


Figura 3.42 a) Fluxograma da ISR do porto B b) Fluxograma da ISR do Timer 2 do PIC18F2550

Depois de um botão ser pressionado existe uma mudança na entrada de um dos pinos RB4 - RB7, o que provoca uma interrupção do porto B do microcontrolador. A ISR do porto B do microcontrolador lê e guarda numa variável (B1) os sinais dos pinos RB4 - RB7. Posteriormente, é ligado o Timer 2 para controlar o *bounce*<sup>3</sup> dos botões de pressão.

Os botões utilizados têm um *bounce* máximo de 5 ms e, como tal, o Timer 2 foi programado nesse sentido. Como a interrupção do Timer 2, na melhor das hipóteses, é gerada decorridos 0,82 ms, foi necessário utilizar uma variável auxiliar (cT2) para contar o número de interrupções. O registo TMR2 de 8 bits ( $TMR_f = 256$ ) foi inicializado a zero, foi escolhido um prescaler = 16 e utilizada a frequência de oscilação ( $f_{osc}$ ) de 20MHz do PIC18F2550. Nestas condições,  $T_{out} = 0,82$  ms e quando  $cT2 = 7$  significa que passaram 5,74 ms.

<sup>3</sup> Ao pressionar um botão com contactos metálicos, a ligação não é estabelecida de imediato, devido ao ressalto (*bounce*) dos contactos.



Desta forma, passados 5,74 ms após um botão ter sido pressionado a ISR do Timer 2 lê novamente os sinais dos pinos RB4 - RB7. Se o estado dos botões for igual antes e depois do controlo do *bounce* é verificado qual o botão que foi pressionado e executada a acção correspondente. No capítulo 3.6 é descrita a função de cada botão e as acções executadas.

A título de exemplo, uma das acções é guardar na memória EEPROM do PIC18F2550 o preço da energia (tarifa) introduzida pelo utilizador. A tarifa é convertida para um valor hexadecimal e guardada nos endereços 00h – 04h (5 bytes) da memória EEPROM.

### 3.4.2.5 Rotinas da interface USB

Dada a complexidade de programação necessária para a comunicação USB entre o PIC e o PC, foram utilizadas as rotinas USB HID (do inglês, *Human Interface Device*) disponibilizadas pela Microchip. A classe USB HID tem como vantagem uma maior universalidade, visto que pode ser utilizada nos computadores modernos. Além disso, a maioria dos sistemas operativos possui *drivers* que atendem às especificações da classe USB HID.

Para responder às necessidades da *firmware* desenvolvida para o PIC18F2550 foi necessário definir os identificadores para o dispositivo de visualização de dados, Vendor ID e Product ID. Além disso, foi ainda necessário modificar a rotina responsável pelo envio e recepção de dados, cujo fluxograma se encontra ilustrado na Figura 3.43.

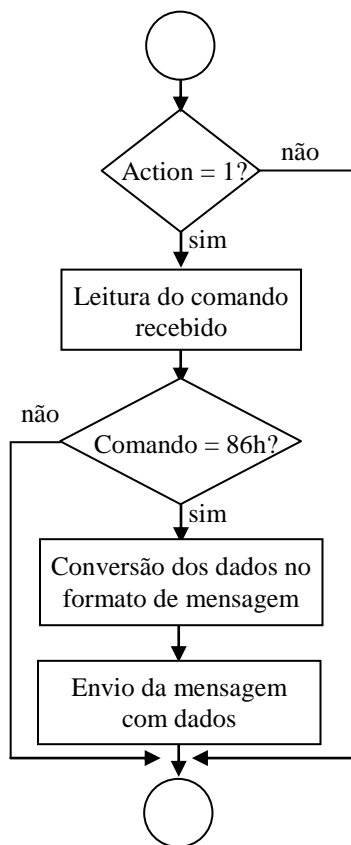


Figura 3.43 Rotina de envio/recepção de dados através da interface USB

A rotina envio/recepção de dados pela interface USB só é executada quando o PIC18F2550 recebe um comando do computador. É igualmente necessário que o PIC esteja a receber os dados de energia do dispositivo de aquisição (Action = 1). Desta forma, o computador recebe sempre os dados de energia actualizados e em tempo real.

Se o comando recebido for igual a 86h significa que o computador está a pedir o envio dos dados de energia. Os dados são convertidos no formato de mensagem descrito no capítulo 3.3.9.3 e são enviados através da interface USB para o computador.

### 3.5 Software

No lado do PC, foi desenvolvido um pequeno programa em linguagem C#, com a ajuda da ferramenta Microsoft Visual Studio 2008. Este programa comunica com o dispositivo de visualização de dados através da interface USB, recebendo e guardando os dados num ficheiro. A partir deste, a aplicação disponibiliza um conjunto de gráficos diários sobre os dados de energia oferecendo ao utilizador uma ferramenta visual de grande utilidade.

Para o programa identificar e trocar dados com o dispositivo de visualização foi utilizada a USB HID API (do inglês, *Application Programming Interface*) disponibilizada pela Microchip. A API da Microchip possui diversas funções que permitem identificar e trocar dados com os dispositivos USB ligados. As duas principais funções desta API são:

- “FindTheHID”: Esta função é responsável por detectar um dispositivo HID ligado, com base num determinado Vendor ID e Product ID.
- “ReadAndWriteToDevice”: Se o dispositivo HID for detectado, esta função envia e recebe dados (no máximo 64 bytes). Se ocorrer uma falha na transmissão é dada essa indicação.

Na Figura 3.44 está ilustrada a interface gráfica do programa, que possibilita ao utilizador realizar algumas operações, de forma simples e rápida.

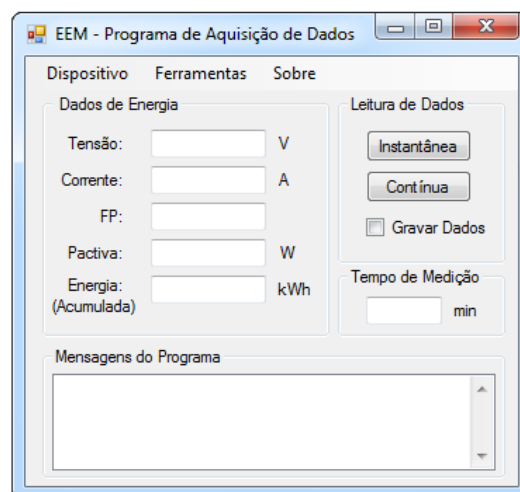


Figura 3.44 Interface gráfica do programa desenvolvido para o computador

A interface gráfica possui uma barra de menus da qual o utilizador se pode servir para aceder a diferentes menus e realizar algumas operações.

No menu ‘Dispositivo’ existe um botão, ‘Procurar’, que quando pressionado executa a função “FindTheHID”, ou seja, verifica se o dispositivo de visualização de dados está ligado ao computador.

O menu ‘Ferramentas’ possui dois botões, o ‘Gráficos’ e o ‘Ficheiro’. O botão ‘Gráficos’ abre uma janela que permite visualizar os gráficos diários de consumo. O botão ‘Ficheiro’ abre também uma janela onde o utilizador pode abrir e visualizar os dados existentes no ficheiro txt, criar um novo ficheiro e definir o intervalo de gravação dos dados no ficheiro.

A interface gráfica possui ainda dois botões, ‘Instantânea’ e ‘Contínua’, que são usados para instruir o dispositivo de visualização sobre o modo de envio dos dados de energia. Ao pressionar um destes botões é primeiro verificado se o dispositivo de visualização está ligado ao computador. Depois é executada a função “ReadAndWriteToDevice”, que envia o comando 86h para o dispositivo de visualização e recebe deste os dados de energia. O botão ‘Instantânea’ pede o envio imediato dos dados de energia enquanto que o botão ‘Contínua’ pede o envio dos dados a cada segundo.

O dispositivo de visualização envia para o computador a média da energia consumida por hora ( $E_{\text{horaria}}$ ). No entanto, como o programa é utilizado para fazer registos históricos de consumo, a  $E_{\text{horaria}}$  mostra-se pouco útil para o utilizador. Deste modo, quando o programa recebe a  $E_{\text{horaria}}$  converte-a para energia acumulada ( $E_{\text{acum}}$ ), através da equação 3.11. Esta operação é possível porque o programa também recebe o tempo de medição de dados em minutos ( $t_{\text{min}}$ ).

$$E_{\text{acum}} = E_{\text{horaria}} \times \frac{t_{\text{min}}}{60} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Associada à acção realizada pelo botão ‘Contínua’ existe uma caixa de verificação, a ‘Gravar Dados’, que quando marcada permite guardar os dados de energia recebidos no ficheiro txt. Os dados são guardados segundo o formato ilustrado na Figura 3.45. Importa ainda referir que é guardada a energia acumulada e não a média da energia consumida.

| Data                |   | Tensão |   | Corrente |   | PF   |   | P <sub>activa</sub> |   | Energia    |
|---------------------|---|--------|---|----------|---|------|---|---------------------|---|------------|
| DD-MM-AAAA HH:MM:SS | : | XXX,XX | : | XX,XXX   | : | X,XX | : | XXXXX,XX            | : | XXXXX,XXXX |

Figura 3.45 Formato dos dados guardados no ficheiro txt

Todos os dados de energia recebidos são mostrados ao utilizador na interface gráfica do programa. Como o programa precisa de comunicar com o dispositivo de visualização e mostrar os dados recebidos através da interface gráfica, foi necessário utilizar *Threads*. As *Threads* permitem que sejam executadas diversas funções ao mesmo tempo sem bloquear o programa.

Os gráficos diários de consumo são criados a partir dos dados guardados no ficheiro txt. Através de ‘Ferramentas → Gráficos’ é possível aceder à janela ilustrada na Figura 3.46 que permite visualizar gráficos diários de tensão, corrente, factor de potência, potência activa e energia acumulada. Todos os dias de consumo existentes no ficheiro aparecem numa *combobox*. Assim, é mais fácil para o utilizador saber que dia escolher para fazer a visualização dos gráficos.

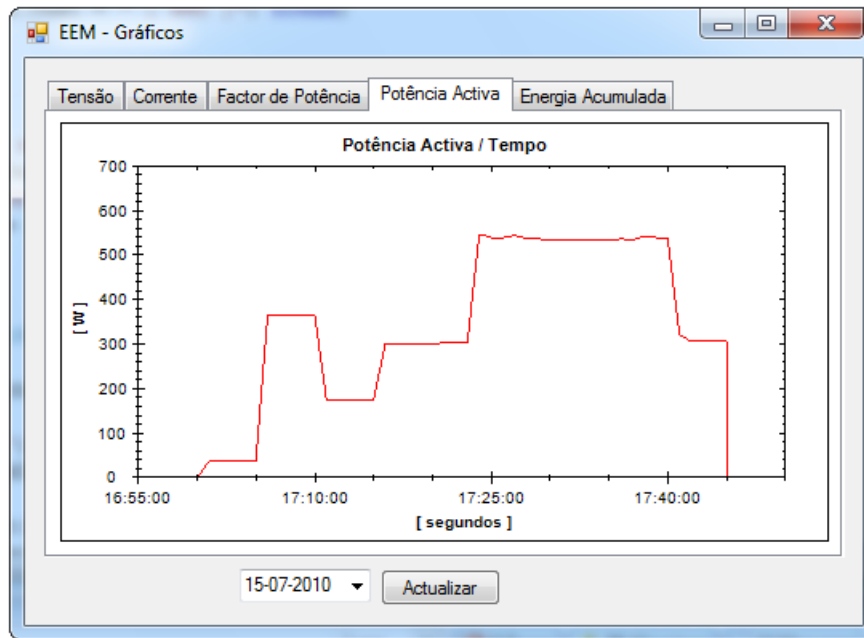
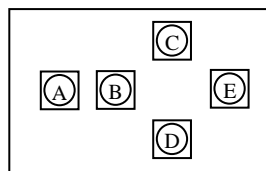


Figura 3.46 Janela de visualização dos gráficos diários de consumo

### 3.6 Interface do Dispositivo de Visualização

O dispositivo de visualização de dados tem cinco botões de pressão. Um botão faz o *reset* do dispositivo e os outros quatro permitem ao utilizador seleccionar e executar diversas funções mostradas no visor LCD. A Figura 3.47 identifica os cinco botões da interface do dispositivo.



Legenda da figura 3.47:

- A. *Reset* do dispositivo
- B. Voltar para o menu principal
- C. Mover o cursor para cima
- D. Mover o cursor para baixo
- E. Executar função seleccionada

Figura 3.47 Descrição dos botões do dispositivo de visualização de dados

A Figura 3.48 ilustra os principais painéis de visualização apresentados no visor LCD.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <div>EEM [R] [USB]<br/>[ 1. DADOS ]<br/>2. OPCOES<br/>3. CALIBRACAO</div> <p>1) Menu principal</p>                        | <div>DADOS<br/>[ 1. INICIAR ]</div> <p>2) Pedir envio de dados</p>   | <div>DADOS [R]<br/>[ 1. VISUALIZAR ]<br/>2. PARAR</div> <p>3) Visualizar ou parar recepção de dados</p>               |
| <div>D1 [R]<br/>TENSAO: 230.23 V<br/>CORRENT: 12.456 A<br/>FP: 0.78</div> <p>4) Tensão, corrente e factor de potência</p> | <div>D2 [R]<br/>PACTIVA: 2236.84 W<br/>ENER(H): 32.234 kWh<br/>CUSTOS: 3.9778 E</div> <p>5) Potência activa, média da energia e custos</p> | <div>OPCOES<br/>[ 1. TARIFA ]</div> <p>6) Menu de opções</p>  |
| <div>TARIFA<br/>+<br/>0.1243 EUROS<br/>-</div> <p>7) Actualizar tarifa energética</p>                                     | <div>CALIBRACAO<br/>[ 1. INICIAR ]</div> <p>8) Iniciar calibração do CS5463</p>  | <div>AVISO<br/>RECEPTOR NAO<br/>RESPONDE ...<br/>(ACK)</div> <p>9) Tempo de espera de <i>acknowledge</i> excedido</p> |

Figura 3.48 Principais painéis de visualização do visor LCD

O menu principal pode ser acedido a qualquer momento pressionando o botão (B). Neste menu é possível aceder à opção desejada através dos botões (C) e (D) movendo o cursor para cima ou para baixo. Para seleccionar a função desejada prime-se o botão (E).

Se for seleccionada a opção ‘1. DADOS’ podem aparecer dois painéis de visualização diferentes consoante o estado de acção em que o dispositivo se encontra. Se o dispositivo de visualização não estiver a receber os dados de energia, o utilizador pode seleccionar a opção ‘1. INICIAR’ para pedir o envio dos dados por parte do dispositivo de aquisição. Caso o dispositivo de visualização esteja a receber os dados, o utilizador pode seleccionar a opção ‘1. VISUALIZAR’ para os visualizar ou ‘2. PARAR’ para parar a recepção.

A opção ‘2. OPCOES’ do menu principal permite ao utilizador actualizar a tarifa energética. Nesta função, os botões (C) e (D) são utilizados para aumentar ou diminuir o valor da tarifa, em incrementos de 0,0001 €. Depois de escolher o valor pretendido, utiliza-se o botão (B) para guardar a nova tarifa na memória EEPROM e voltar ao menu principal.

Se o utilizador quiser calibrar o medidor de potência CS5463, selecciona a opção ‘3. CALIBRACAO’ do menu principal.

Se existir uma falha na comunicação, resultante da não recepção de um *acknowledge*, aparece automaticamente no visor uma mensagem a informar o utilizador.

Para concluir, o visor poderá ainda apresentar duas informações complementares na primeira linha. O símbolo [R] indica que o dispositivo de visualização está a receber os dados de energia do dispositivo de aquisição e o símbolo [USB] indica que o dispositivo de visualização está ligado a um computador através da porta USB.



## Capítulo 4

# Construção do Protótipo

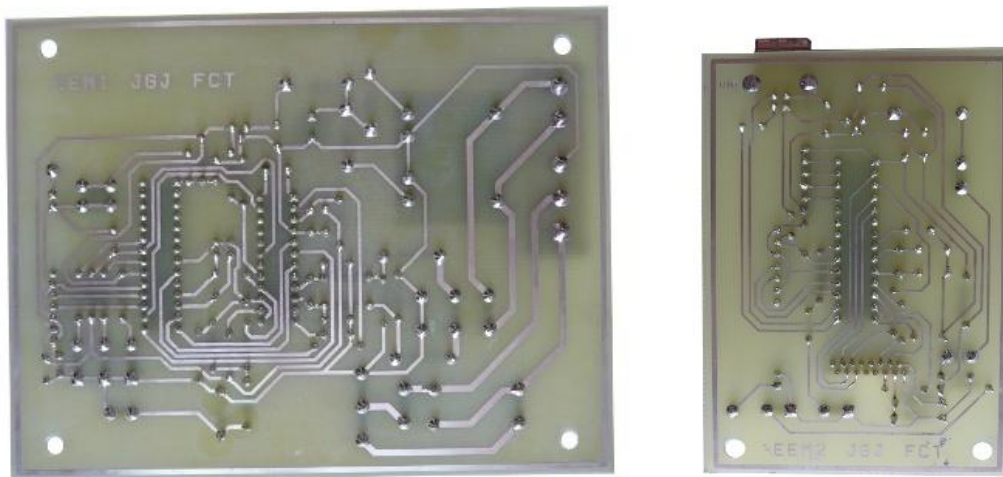
A construção do protótipo do sistema de monitorização compreende diversas fases, nomeadamente a produção das placas de circuito impresso (PCB) dos dois dispositivos, a soldadura dos componentes electrónicos e a instalação dos componentes em caixas.

### 4.1 Produção das PCBs

O *layout* das PCBs foi desenvolvido através do programa OrCad 9.1 da Cadence Design Systems. Nos apêndices II e III encontram-se, respectivamente, os circuitos eléctricos e os *layouts* PCB de cada dispositivo.

As PCBs foram produzidas através do processo de corrosão. Apesar de ser um processo demorado, entre 30 e 45 minutos, tem a vantagem de eliminar todo o cobre à volta das pistas do circuito impresso, o que reduz as interferências electromagnéticas. Segue-se a explicação, de forma simplificada, do processo de corrosão realizado para manufacturar as PCBs. Para este processo foram utilizadas placas de cobre pré-sensibilizadas com uma camada de positiv 20.

O processo inicia-se colocando a placa, numa insoladora, com o acetato do circuito por cima, de forma a fazer o decalque do circuito na placa. A luz ultra-violeta da insoladora queima todo o positiv 20 excepto o referente ao circuito impresso – esta operação tem uma duração aproximada de 4 minutos. De seguida, mergulha-se a placa numa solução de hidróxido de sódio para remover o positiv 20, ficando apenas o circuito impresso na placa. Por último, coloca-se a placa na máquina de corrosão, na qual é removido o cobre nu (aquele que não tem positiv 20) através de um “banho” de ácido perclorato de ferro. Após a remoção do cobre, a placa é lavada com acetona e prateada para prevenir a oxidação. A Figura 4.1 ilustra as camadas inferiores (*bottom layers*) das PCBs dos dispositivos.



a) Dispositivo de aquisição de dados

b) Dispositivo de visualização de dados

Figura 4.1 *Bottom layers* das PCBs dos dispositivos

## 4.2 Soldadura dos Componentes

A soldadura dos componentes electrónicos nas PCBs constituiu o passo seguinte da construção do protótipo. A Figura 4.2 e a Figura 4.3 ilustram os componentes soldados nas placas do dispositivo de aquisição e do dispositivo de visualização, respectivamente.

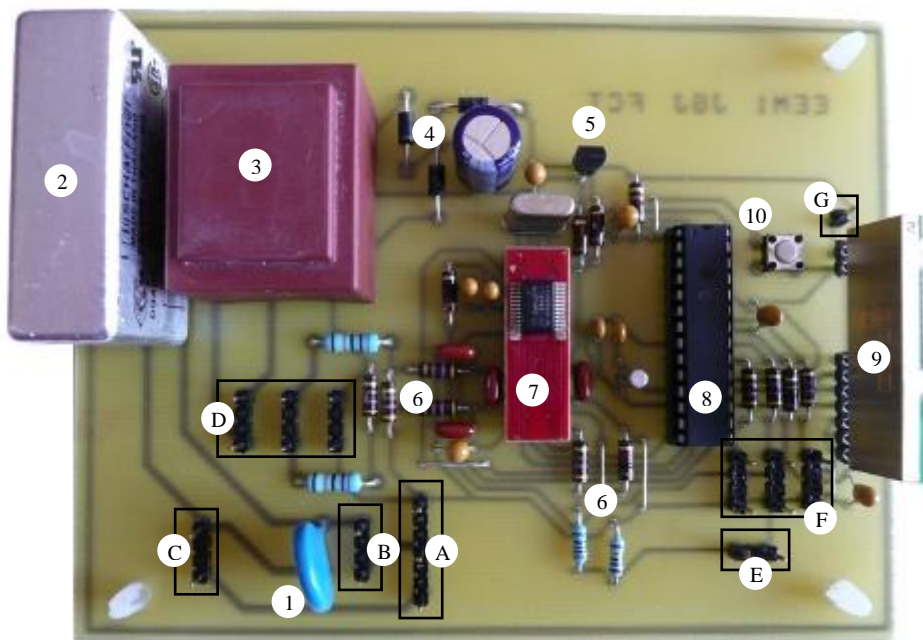


Figura 4.2 Componentes soldados na PCB do dispositivo de aquisição de dados





entrada no canal de tensão do CS5463 e é utilizado para efeitos de calibração do CS5463. É possível seleccionar 0 V (GND) ou os 230 V da rede eléctrica.

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 ilustram a instalação em caixas dos componentes do dispositivo de aquisição e do dispositivo de visualização, respectivamente.

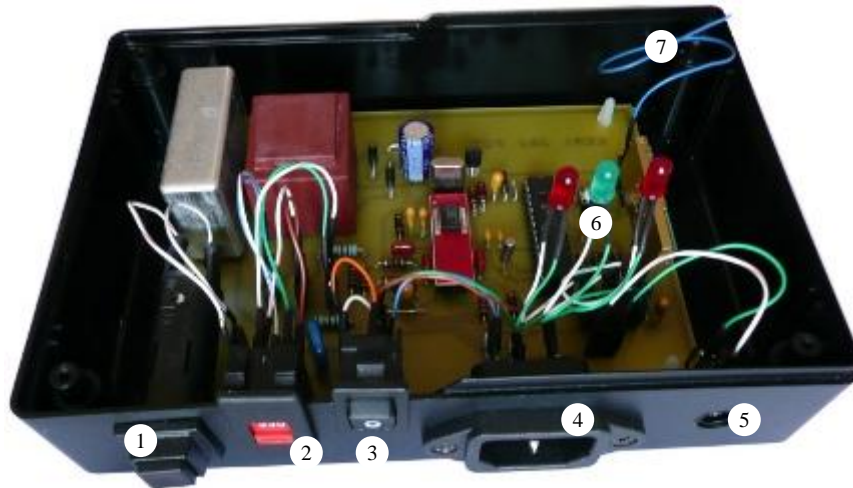


Figura 4.4 Imagem do interior do dispositivo de aquisição de dados

Legenda da figura 4.4:

- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| 1. Disjuntor térmico                        | 5. Entrada do sinal de corrente |
| 2. Selector de tensão                       | 6. LEDs                         |
| 3. Interruptor ligar/desligar               | 7. Antena                       |
| 4. Entrada do sinal de tensão / alimentação |                                 |



Figura 4.5 Imagem do interior do dispositivo de visualização de dados

Legenda da figura 4.5:

- |                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 1. Interruptor ligar/desligar | 3. Pilha 9 V |
| 2. LEDs                       | 4. Antena    |

## 4.4 Módulos de Leitura de Sinais

Como já foi referido anteriormente, na leitura da corrente eléctrica é utilizado um transformador de corrente *split core*, que permite medir os consumos de um circuito do quadro eléctrico de uma habitação. A leitura do sinal de tensão e, consequentemente a alimentação do dispositivo de aquisição de dados é realizada através de três pinças de crocodilo isoladas, ilustradas na Figura 4.6, uma preta para a terra e duas vermelhas para a fase e neutro.



Figura 4.6 Pinças de crocodilo utilizadas na leitura da tensão no quadro eléctrico

Uma das particularidades do sistema implementado é ser capaz de monitorizar os consumos de energia eléctrica ao nível do equipamento. No entanto, com o sensor de corrente escolhido não é possível ler a corrente abraçando o cabo de alimentação do equipamento. Assim, foi construído um módulo, ilustrado na Figura 4.7, que se coloca entre a tomada eléctrica e o equipamento que se pretende monitorizar.



Figura 4.7 Módulo utilizado na monitorização ao nível do equipamento eléctrico

Este módulo, além de alimentar o dispositivo de aquisição de dados, lê o sinal de tensão da rede eléctrica e disponibiliza um fio condutor (fase) para colocar o sensor de corrente. Este módulo pode ser utilizado para monitorizar equipamentos eléctricos com um consumo máximo de 16 A.

No apêndice I, encontra-se a lista de todo o material utilizado na construção do protótipo do sistema de monitorização. O custo de produção do protótipo foi de 280,817 €<sup>4</sup>.

## 4.5 Especificações

As especificações do protótipo do sistema de monitorização de energia eléctrica são apresentadas na Tabela 4.1.

| Parâmetro                               | Símbolo    | Mínimo | Típico | Máximo | Unidades |
|---|------------|--------|--------|--------|----------|
| Condições de Funcionamento Recomendadas |            |        |        |        |          |
| Gama de Tensão                          | $V_{rms}$  | 207    | 230    | 253    | V        |
| Gama de Corrente                        | $I_{rms}$  | 0      | -      | 65     | A        |
| Frequência                              | Freq       | -      | 50     | -      | Hz       |
| Consumos <sup>(1)</sup>                 |            |        |        |        |          |
| Dispositivo de Aquisição                | $I_{DAD}$  | -      | 0,040  | 0,047  | A        |
| Dispositivo de Visualização             | $I_{DVD}$  | -      | 0,058  | 0,064  | A        |
| Erros de Medição <sup>(2)</sup>         |            |        |        |        |          |
| $V_{rms}$ (207 - 253 V)                 | $V_{erro}$ | -      | < 0,15 | -      | %        |
| $I_{rms}$ (0,3 - 65 A)                  | $I_{erro}$ | -      | < 1    | -      | %        |
| $P_{activa}$ (115 – 16555 W)            | $P_{erro}$ | -      | < 1    | -      | %        |
| Características da Comunicação Sem Fios |            |        |        |        |          |
| Frequência                              | $Freq_T$   | -      | 433,92 | -      | MHz      |
| Período de Transmissão                  | $P_T$      | -      | 1      | -      | s        |
| Alcance (linha de vista)                | $A_T$      | -      | -      | 20     | m        |
| Resolução das Medições                  |            |        |        |        |          |
| $V_{rms}$                               | $V_{res}$  | -      | 0,01   | -      | V        |
| $I_{rms}$                               | $I_{res}$  | -      | 0,001  | -      | A        |
| $P_{activa}$                            | $P_{res}$  | -      | 0,01   | -      | W        |

<sup>(1)</sup> Consumos típicos medidos durante os testes de funcionamento do sistema;

<sup>(2)</sup> Determinação dos erros de medição apresentada no capítulo 5.2.

Tabela 4.1 Especificações do sistema de monitorização desenvolvido

<sup>4</sup> Não estão incluídos os custos de produção das PCBs (hidróxido de sódio, ácido perclorato de ferro e prateador) nem os custos dos fios condutores utilizados para fazer as ligações de alguns componentes aos respectivos conectores.

## Capítulo 5

# Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados e analisados os testes experimentais realizados com o protótipo do sistema de monitorização, a fim de avaliar a sua conformidade com as especificações do projecto.

### 5.1 Calibração

O processo de calibração do dispositivo de aquisição foi realizado para garantir a validade dos dados medidos. Este processo baseou-se na eliminação da componente de *offset* dos canais de entrada do CS5463, na compensação da deslocação de fase e no ajuste dos factores de conversão.

#### 5.1.1 Offset dos canais de entrada do CS5463

Como já referido no capítulo 3.3.1, o CS5463 pode ser calibrado por software, no qual são compensados os valores de *offset* DC e AC dos canais de tensão e de corrente. O dispositivo de aquisição de dados foi construído para que a componente de *offset* do CS5463 possa ser calibrada a qualquer momento de uma forma simples e rápida. O processo de calibração inicia-se colocando o selector de tensão do dispositivo de aquisição na posição de 0 V e o sensor de corrente livre de qualquer condutor eléctrico. As duas entradas diferenciais ( $V_{IN}$  e  $I_{IN}$ ) do CS5463 ficam então com um valor real de tensão de 0 V. O CS5463 está pronto para ser calibrado, sendo o processo de calibração realizado, conforme descrito no capítulo 3.4.1.5.

A Tabela 5.1 mostra os dados medidos pelo dispositivo de aquisição para sinais de entrada iguais a zero, antes e depois da componente de *offset* do CS5463 ser calibrada.

| Calibração<br>CS5463 ( <i>offset</i> ) | $V_{rms}$ (V) | $I_{rms}$ (A) | PF  | $P_{activa}$ (W) |
|--|---------------|---------------|-----|------------------|
| Antes                                  | 20,66         | 1,360         | 1,0 | 27,65            |
| Depois                                 | 0,07          | 0,0           | 0,0 | 0,0              |

Tabela 5.1 Medição de dados antes e depois da calibração do CS5463 ( $V_{IN} = I_{IN} = 0$ )

Como se pode observar na Tabela 5.1, a calibração do CS5463 elimina praticamente todo o *offset* dos canais de entrada, apresentando o canal de tensão um *offset* residual de 0,07 V. No entanto, este valor é desprezável face aos valores nominais de tensão utilizados pelo protótipo, ou seja, 230 V.

### 5.1.2 Deslocação de fase

A compensação da deslocação de fase (*phase shift*) introduzida pelo transformador de corrente CR3110 representou a segunda fase de calibração. Como o suporte técnico do CR3110 não especifica a deslocação de fase do transformador, foi utilizado um osciloscópio digital Fluke 123 para a determinar. Este osciloscópio apresenta uma resolução de 1° e uma exactidão inferior a 1° para o cálculo da deslocação de fase entre dois sinais. Na entrada A do osciloscópio ligou-se o sinal de tensão da rede eléctrica (sinal condicionado) e na entrada B ligou-se o sinal de tensão produzido no secundário do transformador CR3110, proporcional à corrente consumida por um equipamento eléctrico com um  $PF = 1$ . A Figura 5.1 ilustra os dois sinais lidos com o osciloscópio e a deslocação de fase entre eles.

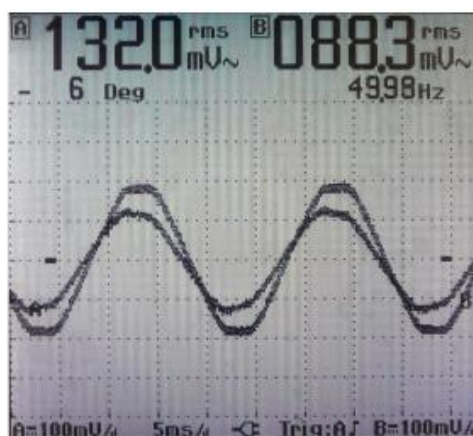


Figura 5.1 Leitura da deslocação de fase introduzida pelo sensor de corrente CR3110

Como se pode observar na Figura 5.1, o sinal da entrada B, proporcional à corrente lida pelo CR3110, tem um atraso de fase de 6° em relação ao sinal de tensão da rede eléctrica da entrada A. Assim, é possível concluir que o transformador de corrente CR3110 introduz uma deslocação de fase de aproximadamente 6°.

O CS5463 tem capacidade para ajustar deslocações de fase. No entanto, para sinais de 50 Hz, o ajuste das deslocações está limitado a  $\pm 2,3^\circ$ . Desta forma, com este componente foi apenas possível compensar um avanço de fase de  $2,3^\circ$ , sobrando ainda uma deslocação de  $3,7^\circ$  para corrigir. Atendendo às condições de funcionamento do protótipo, não se considerou justificável o investimento em componentes electrónicos que levassem a uma diminuição da deslocação de fase. O sistema

desenvolvido destina-se à monitorização dos consumos de energia eléctrica de uma habitação, não sendo necessário uma grande exactidão de medição tal como se tem com um multímetro.

### 5.1.3 Factores de conversão

O ajuste dos factores de conversão utilizados para converter os dados medidos e guardados em registos de 3 bytes para os seus valores reais constituiu o último processo de calibração. Estes factores dependem sobretudo das resistências utilizadas no condicionamento dos sinais de tensão e de corrente. Para minimizar o erro de conversão, foram medidos e utilizados os valores reais de cada resistência. Todas as resistências foram medidas com um multímetro Fluke 115, que apresenta uma resolução de 0,1  $\Omega$  e uma exactidão inferior a 0,9 %.

## 5.2 Erros de Medição

A aferição da calibração do dispositivo de aquisição de dados foi efectuada através da realização de diversos ensaios, nomeadamente a determinação dos erros de medição do valor eficaz da tensão ( $V_{rms}$ ), do valor eficaz da corrente ( $I_{rms}$ ) e da potência activa ( $P_{activa}$ ).

Os valores de  $V_{rms}$  e de  $I_{rms}$  medidos pelo dispositivo de aquisição foram comparados com os medidos por um multímetro Fluke 115. Este multímetro é True RMS e apresenta uma resolução de 0,1 V e uma exactidão inferior a 1 % para medição de tensões alternadas, e uma resolução de 0,001 A e uma exactidão inferior a 1,5 % para medição de correntes alternadas.

### 5.2.1 Valor eficaz da tensão

O sinal de tensão é lido dos 230 V da rede eléctrica, podendo ter uma variação de  $\pm 10$  %. Como tal, para determinar o erro de medição de  $V_{rms}$  foi suficiente ligar o dispositivo de aquisição à rede eléctrica e proceder a algumas leituras. A Tabela 5.2 mostra os resultados da avaliação do erro de medição de  $V_{rms}$ .

| $V_{rms}$ (V) |           | Erro de Medição (%) |
|---------------|-----------|---------------------|
| Fluke 115     | Protótipo |                     |
| 232,6         | 232,93    | 0,14                |
| 233,0         | 233,33    | 0,14                |
| 233,8         | 233,97    | 0,07                |
| 234,1         | 234,35    | 0,11                |

Tabela 5.2 Avaliação do erro de medição do valor eficaz da tensão

Como se pode constatar pelos dados apresentados na Tabela 5.2, o dispositivo de aquisição de dados apresenta um erro de medição de  $V_{rms}$  inferior a 0,15 %, o que é muito aceitável atendendo às aplicações a que o protótipo se destina.

### 5.2.2 Valor eficaz da corrente

Atendendo que o dispositivo de aquisição é capaz de medir correntes alternadas até 65 A foi necessário realizar ensaios para diferentes valores de corrente. Foi utilizada uma fonte de tensão alternada variável e uma resistência de elevada potência para produzir uma corrente alternada variável. No entanto, como a resistência utilizada tinha uma corrente máxima de 8 A, não foi possível realizar o teste de linearidade para toda a gama de correntes em que o dispositivo de aquisição pode ser utilizado. A Tabela 5.3 mostra os resultados da avaliação do erro de medição de  $I_{rms}$ .

| $I_{rms}$ (A) |           | Erro de<br>Medição (%) |
|---------------|-----------|------------------------|
| Fluke         | Protótipo |                        |
| 0,075         | 0,068     | 6,30                   |
| 0,135         | 0,130     | 3,12                   |
| 0,299         | 0,296     | 1,00                   |
| 0,495         | 0,499     | 0,81                   |
| 0,854         | 0,861     | 0,82                   |
| 1,635         | 0,166     | 0,67                   |
| 3,617         | 3,635     | 0,50                   |
| 4,852         | 4,879     | 0,56                   |
| 6,121         | 6,134     | 0,21                   |
| 7,76          | 7,779     | 0,24                   |

Tabela 5.3 Avaliação do erro de medição do valor eficaz da corrente

Tal como se esperava, para valores de  $I_{rms}$  muito baixos, o dispositivo de aquisição apresenta um erro de medição elevado. O CS5463 só tem uma exactidão de medição de 0,1 % para uma gama de entrada de correntes entre 0,2 % e 100 % do valor máximo de 0,5 V pico a pico. Para além destes limites, o CS5463 possui um erro de medição elevado. No entanto, se o dispositivo de aquisição medir correntes com um valor eficaz superior a 0,3 A, o erro de medição é inferior a 1 %, conforme mostra a Tabela 5.3.

Apesar de não ter sido possível determinar o erro de medição para  $I_{rms} > 8$  A, prevê-se que o erro seja inferior a 1 %. Como se pode observar pela Tabela 5.3, o erro tende a diminuir para medições de correntes mais elevadas. Além disso, como a leitura de corrente foi limitada a 65 A, a equação 3.1 utilizada no factor de conversão do sinal de corrente, tem um comportamento linear. Assim sendo, o erro que possa ser introduzido pelo factor de conversão será igual para toda a gama de correntes.



### 5.2.3 Potência activa

O erro de medição de  $P_{\text{activa}}$  foi determinado através da realização de ensaios com diferentes cargas com  $PF = 1$ . Como o dispositivo de aquisição de dados apresenta erros de medição de  $V_{\text{rms}}$  e de  $I_{\text{rms}}$  ( $> 0,3$  A) inferiores a 1 %, considerou-se que não seria necessário utilizar um multímetro para medir as tensões e as correntes.

Os valores de  $P_{\text{activa}}$  medidos pelo dispositivo de aquisição foram comparados com a potência calculada a partir dos valores de  $V_{\text{rms}}$  e  $I_{\text{rms}}$  medidos. A Tabela 5.4 mostra os resultados da avaliação do erro de medição de  $P_{\text{activa}}$ .

| Protótipo            |                      |                         | $P_{\text{activa}}$<br>Calculada (W) | Erro de<br>Medição (%) |
|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| $V_{\text{rms}}$ (V) | $I_{\text{rms}}$ (V) | $P_{\text{activa}}$ (W) |                                      |                        |
| 231,92               | 0,127                | 31,09                   | 29,45                                | 5,55                   |
| 232,31               | 0,296                | 70,68                   | 68,76                                | 2,79                   |
| 232,55               | 0,498                | 116,92                  | 115,81                               | 0,96                   |
| 231,97               | 1,437                | 334,32                  | 333,34                               | 0,29                   |
| 232,15               | 2,191                | 509,86                  | 508,64                               | 0,24                   |
| 232,1                | 3,463                | 804,98                  | 803,76                               | 0,15                   |
| 232,18               | 4,601                | 1069,70                 | 1068,26                              | 0,13                   |
| 231,84               | 6,075                | 1409,84                 | 1408,43                              | 0,10                   |

Tabela 5.4 Avaliação do erro de medição da potência activa ( $PF = 1$ )

A  $P_{\text{activa}}$  medida pelo dispositivo de aquisição tem, em média, um desvio de +1,4 W em relação à potência calculada, conforme consta na Tabela 5.4. Consequentemente, o erro de medição de  $P_{\text{activa}}$  para potências baixas é elevado. No entanto, se o dispositivo de aquisição medir cargas superiores a 0,5 A, o erro de medição será inferior a 1 %. A deslocação de fase de  $3,7^\circ$  introduzida pelo transformador CR3110 e um factor de conversão incorrecto são possíveis fontes de erro na medição de  $P_{\text{activa}}$ .

## 5.3 Testes de Funcionamento

Os testes de funcionamento foram realizados para validar o comportamento do protótipo em situações reais de funcionamento. Estes testes dividiram-se em duas fases, uma ao nível do equipamento eléctrico e outra ao nível do quadro eléctrico.

Ao nível do equipamento eléctrico foi utilizado, entre a tomada eléctrica e o equipamento, o módulo referido no capítulo 4.4. A Tabela 5.5 apresenta os dados de energia medidos nos diferentes equipamentos eléctricos.

| Equipamento Eléctrico                                      |                     | Dados Medidos |               |      |                  |
|--|---------------------|---------------|---------------|------|------------------|
|  |                     | $V_{rms}$ (V) | $I_{rms}$ (A) | PF   | $P_{activa}$ (W) |
| Lâmpada incandescente 40 W                                 |                     | 235,66        | 0,173         | 1,00 | 41,70            |
| Lâmpada fluorescente 11W 0,075 A                           |                     | 235,37        | 0,074         | 0,62 | 11,37            |
| Secador de cabelo 600W 2,5 A                               |                     | 234,32        | 2,504         | 1,00 | 587,64           |
| Grelhador eléctrico 2500 W                                 |                     | 234,62        | 10,467        | 1,00 | 2467,75          |
| Computador portátil (transformador 90W)                    | Processamento texto | 231,99        | 0,120         | 0,78 | 21,77            |
|  | Processamento vídeo | 230,18        | 0,229         | 0,79 | 41,84            |
|  | Standby             | 235,20        | 0,019         | 0,25 | 0,95             |
| Televisor LCD 275 W (standby 1,5 W) com sensor de luz (SL) | SL desligado        | 234,71        | 1,188         | 0,97 | 270,69           |
|  | SL ligado (noite)   | 234,53        | 0,404         | 0,93 | 88,36            |
|  | Standby             | 235,13        | 0,068         | 0,10 | 1,55             |

Tabela 5.5 Medição dos consumos ao nível do equipamento eléctrico

Como se pode observar pela Tabela 5.5, os dados medidos traduzem os valores reais consumidos pelos equipamentos e estão em conformidade com as especificações do sistema referidas no capítulo 4.5. Como era esperado, para  $I_{rms} < 0,3$  A o dispositivo de aquisição apresenta um erro de medição superior a 1 %.

Ao nível do quadro eléctrico foram analisados dois circuitos, o circuito de tomadas / iluminação e o circuito geral. Nos dois casos, foi utilizado o sensor de corrente do dispositivo de aquisição. Por questões de segurança, o sinal de tensão foi lido a partir de uma tomada eléctrica próxima do quadro. A Figura 5.2 ilustra a ligação do dispositivo de aquisição de dados ao quadro eléctrico.



Figura 5.2 Ligação do dispositivo de aquisição de dados ao quadro eléctrico

Legenda da Figura 5.2:

- 5. Dispositivo de aquisição de dados
- 6. Sensor de corrente (fase do circuito eléctrico)
- 7. Sinal de tensão / alimentação (obtido de uma tomada eléctrica)

O sensor de corrente foi primeiro ligado ao circuito de tomadas / iluminação. Durante 33 minutos foram testadas seis situações, descritas na Tabela 5.6. Este teste foi realizado de forma controlada ligando os diversos equipamentos em períodos previamente programados. Assim, foi possível confrontar em cada momento os resultados mostrados pelo sistema e os valores esperados em função das características de cada equipamento.

| Situação | Descrição  |
|----------|--|
| 1        | Consumos <i>standby</i> (televisão, set-top box, modem, router sem fios)                 |
| 2        | Situação 1 + 2 Lâmpadas fluorescentes ligadas ( $PF < 1$ , $P_{total} = 34\text{ W}$ )   |
| 3        | Situação 2 + 4 Lâmpadas incandescentes ligadas ( $PF = 1$ , $P_{total} = 100\text{ W}$ ) |
| 4        | Situação 3 + Televisor LCD (88 W) ligado   |
| 5        | Situação 4 + Ar condicionado tradicional ligado  |
| 6        | Situação 5 + Ar condicionado de tecnologia inverter ligado                               |

Tabela 5.6 Descrição do teste realizado ao nível do circuito de tomadas / iluminação

Este teste foi suportado pela integração completa de todos os módulos do sistema de monitorização, o dispositivo de aquisição, o dispositivo de visualização e o software aplicacional do computador. O software aplicacional foi utilizado para gravar os dados de energia num ficheiro (intervalos de 1 minuto) e para a elaboração dos gráficos de consumo. Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 estão ilustrados os gráficos de potência activa e energia acumulada.

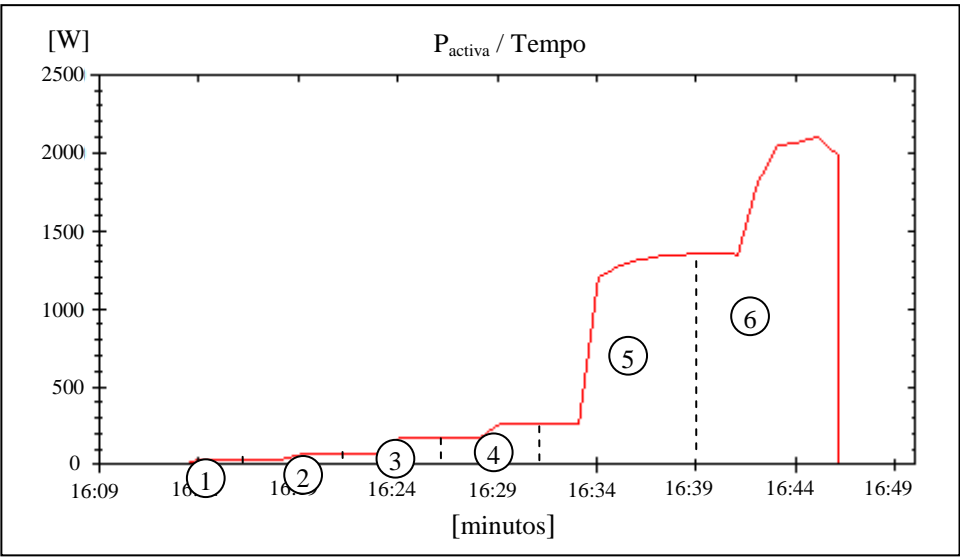


Figura 5.3 Gráfico de  $P_{activa}$  consumida durante o teste ao circuito de tomadas / iluminação

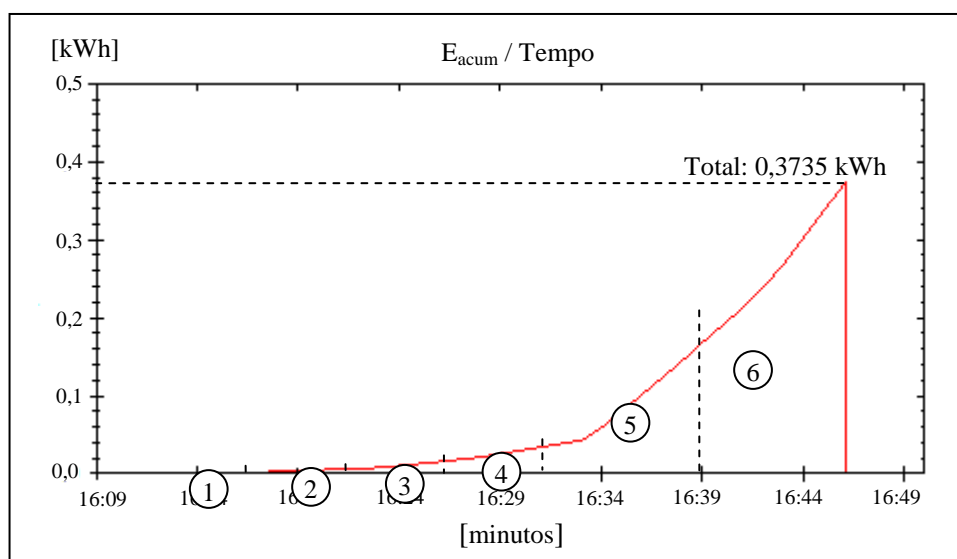


Figura 5.4 Gráfico de  $E_{acum}$  consumida durante o teste ao circuito de tomadas / iluminação

Os dados de energia guardados no ficheiro foram trabalhados através de uma folha de cálculo Excel, tendo sido calculados os valores médios dos diferentes parâmetros para cada uma das situações. Esses valores encontram-se na seguinte tabela.

| Situação | Valores Médios Registados |               |      |                  |
|----------|---------------------------|---------------|------|------------------|
|          | $V_{rms}$ (V)             | $I_{rms}$ (A) | PF   | $P_{activa}$ (W) |
| 1        | 234,37                    | 0,511         | 0,27 | 32,82            |
| 2        | 234,55                    | 0,667         | 0,42 | 65,79            |
| 3        | 234,40                    | 0,995         | 0,72 | 169,94           |
| 4        | 234,29                    | 1,332         | 0,83 | 260,18           |
| 5        | 233,13                    | 5,690         | 0,99 | 1314,84          |
| 6        | 232,94                    | 8,768         | 0,98 | 2001,48          |

Tabela 5.7 Valores médios dos dados de energia em cada situação

Uma vez mais se verifica que os dados medidos pelo protótipo são os esperados relativamente às especificações dos equipamentos contemplados pelo teste nas diferentes situações.

Por último, ligou-se o sensor de corrente ao circuito geral do quadro eléctrico durante 24 horas. Neste período mediram-se os consumos de energia eléctrica da habitação verificando-se a funcionalidade do sistema numa situação real de consumos. Os dados de energia foram gravados num ficheiro a cada dez minutos. A Figura 5.5 e a Figura 5.6 ilustram os gráficos de potência activa e energia acumulada obtidos a partir dos dados medidos.

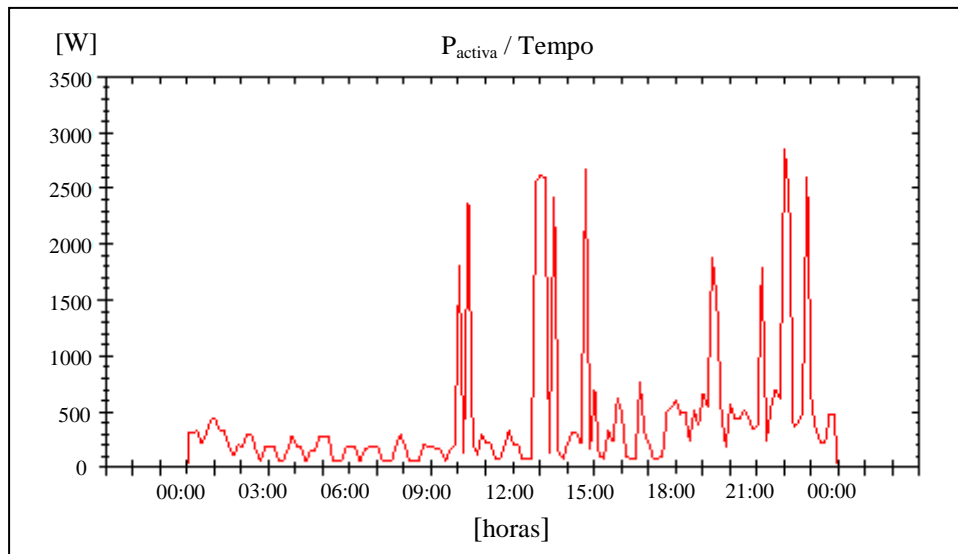


Figura 5.5 Gráfico de  $P_{activa}$  consumida ao nível do circuito geral

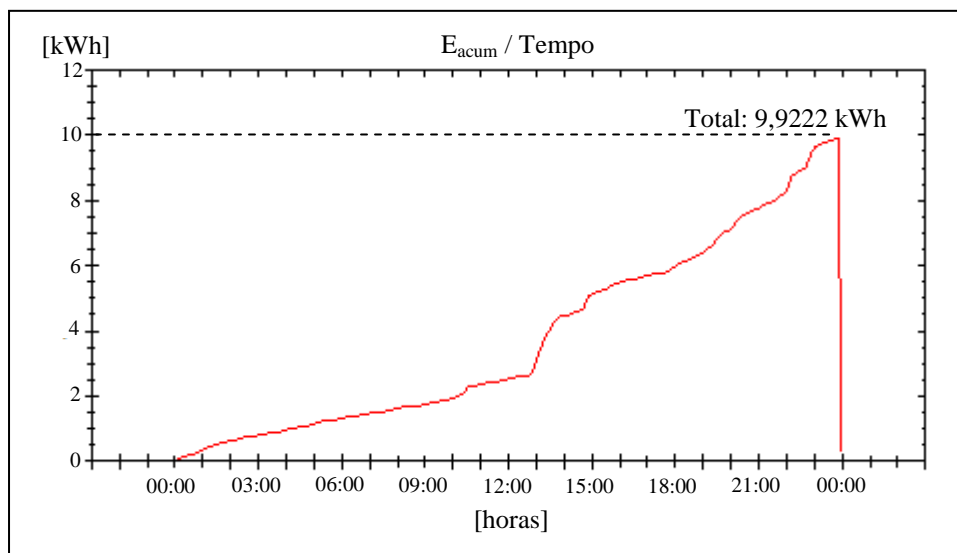


Figura 5.6 Gráfico de  $E_{acum}$  consumida ao nível do circuito geral

Este teste demonstrou como esperado, a conformidade do protótipo com as suas especificações. As variações da potência activa estão de acordo com o ciclo de actividade da habitação e o consumo total de energia (9,9222 kWh) coincidiu com o consumo indicado no contador da EDP (10 kWh).

Em simultâneo com os testes efectuados, foi possível validar os diversos módulos funcionais do sistema, os quais apresentaram um funcionamento correcto e uma integração adequada. Começando pelo dispositivo de aquisição de dados verificou-se o correcto funcionamento dos seus componentes, nomeadamente do sensor de corrente e do transceptor responsável pela comunicação

sem fios. No entanto, o alcance máximo da transmissão sem fios é de apenas 20 metros em linha de vista. Esta limitação prende-se com a qualidade das antenas utilizadas.

Quanto ao dispositivo de visualização de dados constatou-se que os seus componentes apresentam também um funcionamento correcto. O visor LCD mostra a informação de modo legível, o controlo do *bounce* dos botões é realizado com sucesso e a comunicação USB é executada sem problemas.

O software aplicacional desenvolvido para o computador apresenta resultados conforme o esperado. Os dados apresentados na interface gráfica coincidem com os valores mostrados no visor LCD, os ficheiros txt são gravados correctamente e os gráficos de consumo são elaborados com sucesso.

Face ao exposto nos parágrafos anteriores verifica-se que o protótipo responde cabalmente às especificações do projecto.

## 5.4 Análise Sumária de Dados

Atendendo que a finalidade do sistema é monitorizar os consumos eléctricos tendo em vista a melhoria da eficiência energética apresenta-se, de seguida, uma análise sumária dos dados recolhidos. Estes dados foram recolhidos durante os testes de funcionamento do sistema.

- Consumos *standby*: Os consumos *standby* da habitação são aproximadamente 33 W, como se pode verificar na Tabela 5.7, o que equivale a 8 % do consumo médio diário (10 kWh).

- Factor de potência: O factor de potência dos equipamentos em *standby* apresenta um valor muito baixo, conforme mostram as Tabelas 5.5 e 5.7. As lâmpadas fluorescentes compactas possuem também factores de potência baixos embora superiores aos equipamentos em *standby*.

- Sensor de luz do televisor: Este sensor regula o brilho da televisão em função da luminosidade ambiente. Verifica-se ser um mecanismo importante na redução da factura energética. Se o sensor estiver desligado o televisor consome cerca de 271 W. No entanto, com o sensor ligado, em ambiente nocturno, o consumo é cerca de 1/3 do anterior, ou seja, 88 W.

- Climatização: O teste a duas unidades de ar condicionado com a mesma capacidade (9000 Btu/h) mostrou que o equipamento com tecnologia mais recente, tecnologia inverter, consome cerca de 50 % do equipamento mais antigo, conforme se pode concluir da comparação das situações 5 e 6 da Tabela 5.7.

○ Frigoríficos: Pela observação da Figura 5.5, verifica-se a entrada e saída de consumidores durante o período nocturno. Estas variações resultam do funcionamento das máquinas frigoríficas (aproximadamente 250 W no total).

○ Previsão automática dos consumos e dos custos de energia horária: O dispositivo de visualização de dados contém rotinas que permitem mostrar ao utilizador a média dos consumos e dos custos de energia horária. A título exemplificativo, mostra-se na Figura 5.7 uma imagem do visor LCD respeitante ao final do teste ao circuito geral do quadro eléctrico.



Figura 5.7 Imagem do visor LCD no final do teste ao circuito geral

Como se pode observar pela Figura 5.7, a média da energia consumida por hora ao longo das 24 horas de testes foi 0,414 kWh. Consequentemente, o custo horário correspondente foi de 0,0531 €, considerando uma tarifa de 0,1285 €/kWh. A partir destes dados, conclui-se que o custo da energia eléctrica consumida no dia do teste foi de 1,2744 €.

Embora sumária, a análise de dados realizada mostra a aplicabilidade e funcionalidade do sistema desenvolvido, afigurando-se que o mesmo tem adequada aplicação em processos de auditoria e ou de aconselhamento energético.





## Capítulo 6

# Conclusões

O projecto e construção do sistema de monitorização de energia eléctrica para uma habitação, objecto desta dissertação, foi concluído com sucesso. Os objectivos iniciais foram plenamente alcançados destacando-se as seguintes funcionalidades: monitorização ao nível do equipamento e do quadro eléctrico, indicação da média da energia consumida por hora e do custo horário, visualização em tempo real dos dados de energia num pequeno visor LCD, comunicação sem fios entre os dispositivos de aquisição e de visualização e gravação dos dados em computador.

A capacidade do sistema monitorizar consumos tanto ao nível do equipamento eléctrico como ao nível do quadro eléctrico permite ao utilizador perceber qual o peso que cada equipamento ou aplicação tem nos consumos totais de energia eléctrica. O conhecimento da média da energia consumida por hora e do respectivo custo fornecem ao consumidor dados que o motivam para a mudança de comportamentos no sentido da redução dos gastos energéticos. A utilização de comunicação sem fios entre os dispositivos garante maior flexibilidade e facilidade de utilização do sistema. A ligação ao computador permite guardar e utilizar os dados em aplicações informáticas diversas e elaborar, por exemplo, gráficos diários de consumo.

O estudo dos diversos sistemas de monitorização de energia eléctrica, apresentado no capítulo 2, resultou numa visão integrada das tecnologias e funcionalidades necessárias ao desenvolvimento do sistema proposto nesta dissertação. Os testes de funcionamento realizados demonstraram que o protótipo do sistema de monitorização desenvolvido está em conformidade com as especificações estabelecidas, adequando-se inteiramente às aplicações para que foi concebido.

Ao longo da implementação e construção do sistema surgiram diversos contratempos que obrigaram à reformulação de alguns processos. Salientam-se as dificuldades encontradas na comunicação SPI entre o medidor de potência e o microcontrolador, na comunicação sem fios entre os dois dispositivos, na implementação da interface USB com o computador, na programação das interrupções dos microcontroladores e na construção das PCBs.

O desenvolvimento deste projecto permitiu ainda adquirir e integrar conhecimentos de diferentes áreas, nomeadamente de electrotecnia, electrónica, sistemas digitais e sensoriais e telecomunicações, tendo sido assim um trabalho deveras enriquecedor.

A Internet mostrou-se um recurso essencial no desenvolvimento deste projecto, tendo sido fundamental na análise do estado da arte, no contacto com os fabricantes e os fornecedores do material e na pesquisa de soluções para alguns dos problemas encontrados.

Durante o desenvolvimento do sistema foram identificados alguns aspectos que poderão ser explorados e melhorados em trabalhos futuros. De seguida, apresentam-se algumas sugestões neste sentido:

- Adicionar um novo sensor de corrente a fim de duplicar a capacidade de aquisição de dados;
- Melhorar a comunicação sem fios através da utilização de antenas mais sofisticadas e de maior alcance;
- Instalar uma memória não volátil interna no dispositivo de aquisição para gravar os dados medidos directamente no sistema;
- Utilizar um transformador na leitura do sinal de entrada de tensão;
- Reduzir o tamanho das PCBs e dos componentes utilizando tecnologia SMT.

## Bibliografia

CCI. (2006). *Electronic Engineering Excellence*. Obtido em Maio de 2010, de Computer Control Instrumentation: <http://www.power-mate.com.au/>

CE. (2007). *2020 vision: Saving our Energy*. Brussels: European Commission, Directorate-General for Energy and Transport.

CE. (2005). *Directiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 6 de Julho de 2005, relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos que consomem energia e que altera as Directivas 92/42/CEE do conselho e 96/57/CE*. Jornal Oficial da União Europeia L191, de 22.7.2005. pág. 29-58.

CE. (2008a). *Europe's current and future energy position Demand - resources - investments*. Bruxelas, 13 de Novembro de 2008: Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões.

CE. (2008b). *Parecer do Comité Económico e Social Europeu sobre a Proposta de directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)*. Bruxelas, 13 de Novembro de 2008.

Darby, S. (2006). *The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption*. UK: Environmental Change Institute of University of Oxford.

Diy Kyoto. (2006). *Hello. My Name is Wattson*. Obtido em Maio de 2010, de <http://www.diykyoto.com/uk>

EDP. (2010). *Eficiência Energética*. Obtido em Março de 2010, de Eco EDP: <http://www.eco.edp.pt/>

EEA. (2007). *EN18 Final Electricity Consumption (1990-2004)*. Obtido em Janeiro de 2010, de European Environmental Agency: <http://www.eea.europa.eu>

Efergy. (2009). *Monitor. Reduce. Save*. Obtido em Maio de 2010, de <http://www.efergy.com/>

EnergyHub. (2009). *Bringing the Smart Grid Home*. Obtido em Maio de 2010, de <http://www.energyhub.com/>

EnergyMate. (2010). *Yanko Design*. Obtido em Maio de 2010, de Form Beyond Function: <http://www.yankodesign.com/2008/10/13/energy-mate-converts-consumption-into-sense/>

IEA. (2008). *Energy Efficiency Requirements in Buildings Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*. France: International Energy Agency.

IEA. (2009). *World Energy Outlook 2009*. France: International Energy Agency.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Switzerland: Intergovernmental Panel on climate change.

JRC. (2009). *EU energy efficiency measures contribute to stabilise electricity consumption – drop in domestic use*. Bruxelas: Joint Research Centre.

Mountain, D. (2006). *The Impact of Real-Time Feedback on Residential Electricity Consumption: The Hydro One Pilot*. Ontario: Mountain Economic Consulting and Associates Inc.

P3 International. (2008). *Innovative Electronics Solutions*. Obtido em Maio de 2010, de <http://www.p3international.com/>

Parker, D. S., Hoak, D., & Cummings, J. (2008). *Evaluation of Energy Savings from Residential Energy Demand Feedback Devices*. Florida, USA: Final Report by Florida Solar Energy Center to the U.S.

Plogg International. (2008). *Wireless Energy Management*. Obtido em Maio de 2010, de <http://www.plogginternational.com/>

Seligman, C., & Darley, J. M. (1977). *Feedback as a Means of Decreasing Residential Energy Consumption*. Florida, USA: Journal of Applied Psychology.

Stern, N. H. (2006). *The Stern Review of the Economics of Climate Change*. London: HM Treasury.

TED. (2009). *Home Energy Management Systems*. Obtido em Maio de 2010, de The Energy Detective: <http://www.theenergydetective.com/>

WEC. (2008). *Energy Efficiency Policies around the world: Review and Evaluation*. UK: World Energy Council.

Yokogawa. (2001). *Yokogawa Electric Corporation*. Obtido em Maio de 2010, de <http://www.yokogawa.com/>

## Apêndice I: Lista de Material

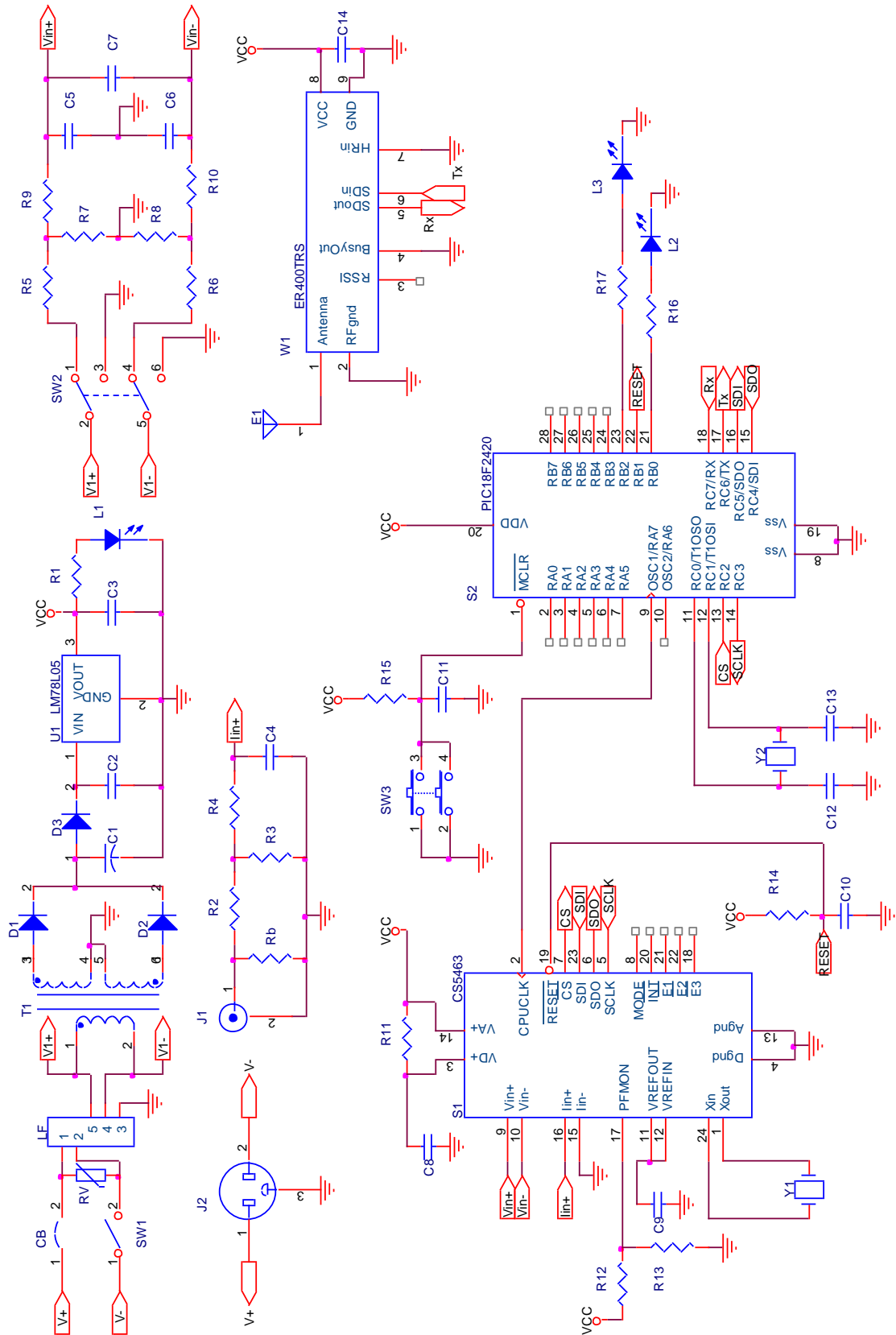
| Componente                                  | Descrição                            | Preço Unitário (€) | Código Farnell |
|---|--------------------------------------|--------------------|----------------|
| T1  | Transformador 2VA 230V 2×6V          | 5,75               | 1214581        |
| U1,U2                                       | Regulador de Tensão +5V, LM78L05     | 0,59               | 9489444        |
| S1  | Medidor de potência, CS5463          | 5,32               | 1506323        |
| S2  | Microcontrolador, PIC18F2420         | 4,3                | 9321195        |
| S3  | Microcontrolador, PIC18F2550         | 4,81               | 9321250        |
| W1,W2                                       | Transceptor sem fios, ER400TRS       | 37,67              | 5096558        |
| S4  | Módulo LCD alfanumérico 20x4         | 45,93              | 9448802        |
| D1,D2                                       | Díodo Schottky 1A, 40V               | 0,18               | 9801219        |
| D3,D4                                       | Díodo Standard 1A, 50V               | 0,075              | 9564993        |
| L2,L3,L5                                    | LED 5mm Vermelho                     | 0,184              | 1003232        |
| L1,L4                                       | LED 5mm Verde                        | 0,181              | 1003234        |
| C1  | Condensador electrolítico 220µF, 35V | 0,181              | 9693688        |
| C2,C3,C8,C9,C10,C11,C14,<br>C15,C16,C17,C21 | Condensador cerâmico 0,1µF 35V       | 0,29               | 9708480        |
| C12,C13,C18,C19                             | Condensador cerâmico 33pF 50V        | 0,129              | 1141761        |
| C5,C6                                       | Condensador cerâmico 22nF 50V        | 0,156              | 1669204        |
| C4,C7                                       | Condensador cerâmico 18nF 50V        | 0,155              | 1669203        |
| C20   | Condensador cerâmico 470nF 50V       | 0,45               | 1216446        |
| R1,R3,R12,R13,R16,<br>R17,R18,R20,R22       | Resistência 1kΩ 0,25W 5%             | 0,29               | 1265072        |
| R4,R7,R8,R9,R10                             | Resistência 470Ω 0,25W 5%            | 0,29               | 1265070        |
| R11   | Resistência 10Ω 0,25W 5%             | 0,29               | 1265059        |
| R14,R15,R19,R21                             | Resistência 10kΩ 0,25W 5%            | 0,29               | 1265079        |
| R5,R6                                       | Resistência 820kΩ 0,75W 1%           | 0,062              | 9497919        |
| R2  | Resistência 316kΩ 0,25W 0,1%         | 0,66               | 1083197        |
| Rb  | Resistência 10Ω 0,25W 0,1%           | 1,26               | 1083036        |
| RV  | Varistor 71.0J 275Vac                | 0,51               | 1004362        |
| Y1  | Cristal 4,096MHz                     | 3,03               | 1666955        |
| Y2  | Cristal 32,768kHz                    | 1,56               | 1216227        |
| Y3  | Cristal 20.0MHz                      | 1,23               | 1666982        |
| SW3,SW5,SW6,SW7,SW8,SW9                     | Botão de pressão, B3F-1000           | 0,42               | 176432         |
| USB   | Socket USB                           | 0,58               | 1177885        |
| SW1,SW4                                     | Interruptor On/Off                   | 1,44               | 1162728        |
| SW2   | Selector de tensão                   | 1,64               | 242536         |
| CB1   | Disjuntor 0,5A 250Vac                | 13,42              | 1003728        |
| LF  | Filtro EMC 0.5A                      | 10,48              | 1191336        |
| BT  | Pilha 9V 500mAh                      | 2,81               | 817405         |

| Componente | Descrição                            | Preço Unitário (€) | Código Farnell |
|------------|--------------------------------------|--------------------|----------------|
| J3         | Conector para o LCD BT21216          | 8,38               | 1220461        |
| -          | Cabo para o LCD BT21300              | 3,71               | 1220462        |
| J2         | Conector (tensão)                    | 1,62               | 9521631        |
| J1         | Conector (corrente)                  | 1,77               | 1216993        |
| -          | Clip de montagem para os LEDs        | 0,24               | 8576378        |
| -          | Caixa ABS 178×122×55mm               | 5,2                | 938865         |
| -          | Caixa ABS 146×91×33mm                | 9,33               | 4952856        |
| -          | Socket (tensão)                      | 2,03               | 1172510        |
| -          | Socket (corrente)                    | 2,07               | 1216986        |
| -          | 2 Placas de cobre pré-sensibilizadas | 13,51              | 3204935        |

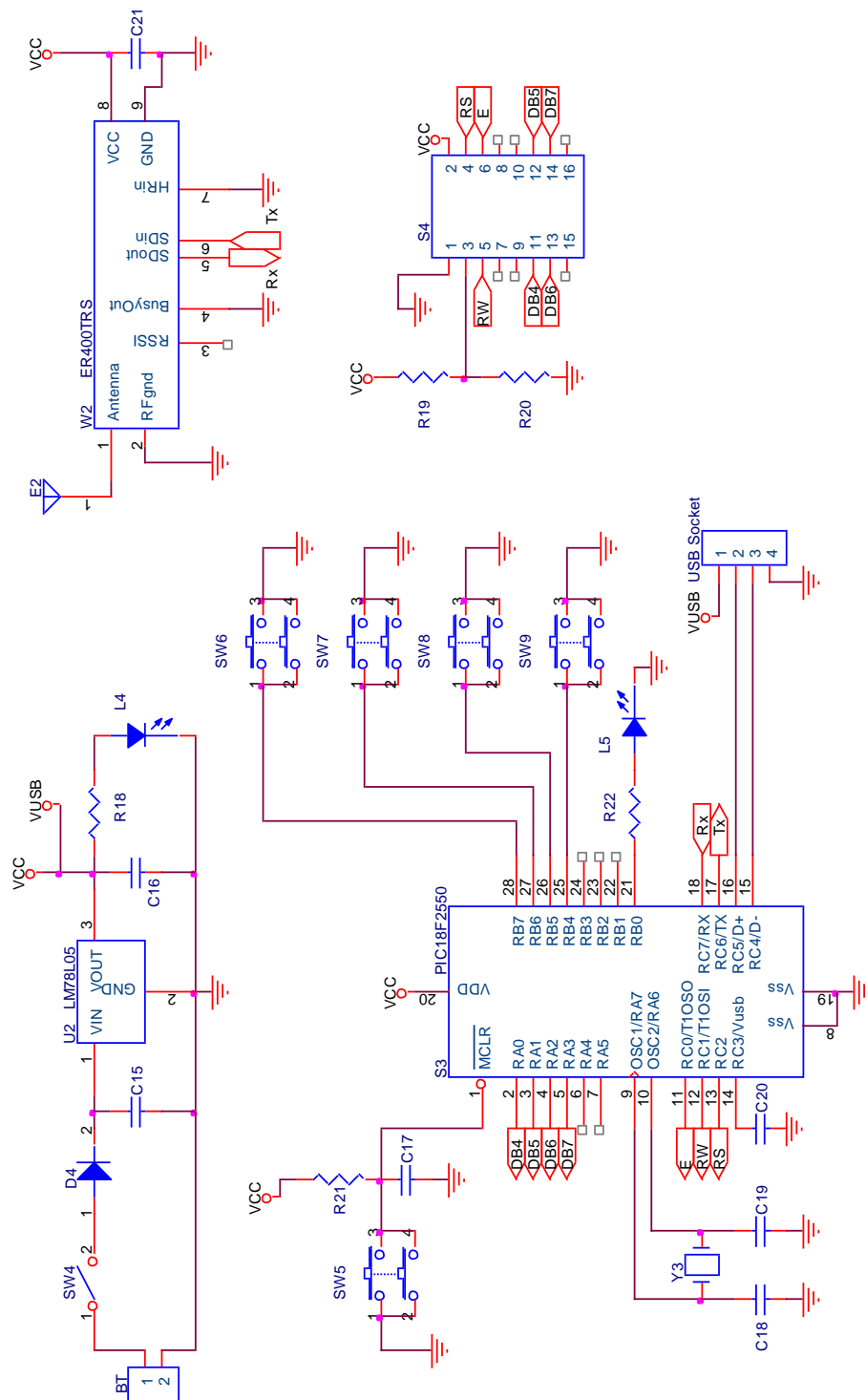
| Componente | Descrição   | Preço Unitário (€) | Código DigiKey |
|------------|---|--------------------|----------------|
| T2         | Transformador de corrente <i>split-core</i><br>75A 1:3000 | 11,88              | 582-1004-ND    |

# Apêndice II: Circuitos Eléctricos

## A. Dispositivo de aquisição de dados



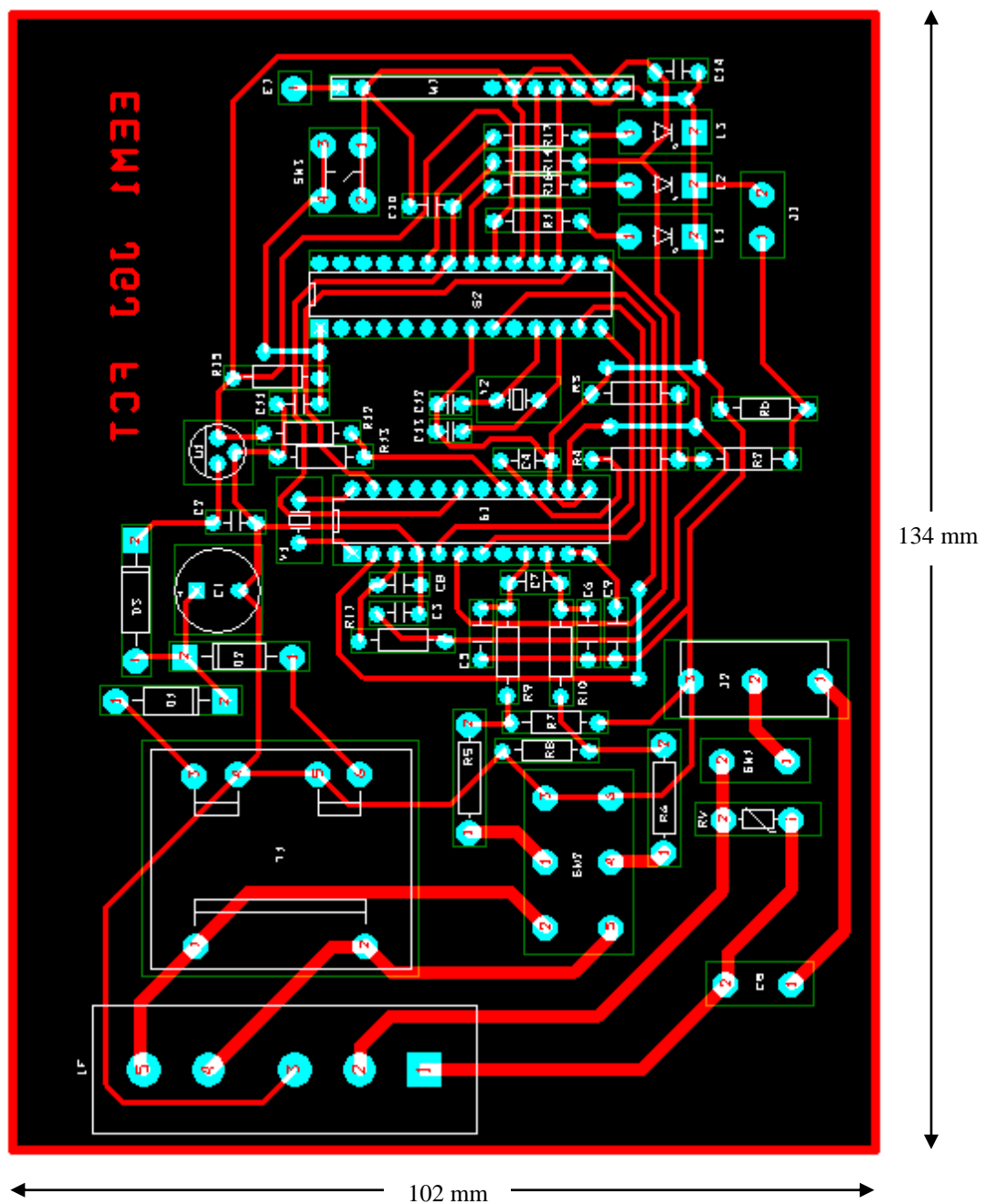
## B. Dispositivo de visualização de dados



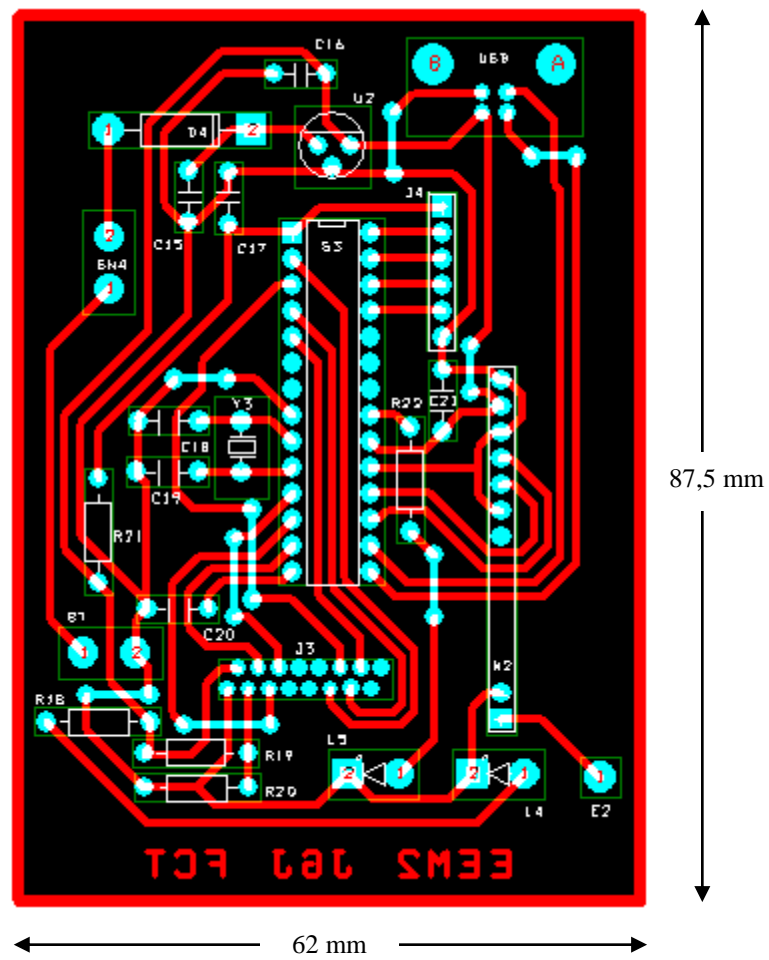


## Apêndice III: Layouts PCB

### A. Dispositivo de aquisição de dados



## B. Dispositivo de visualização de dados



(Placa dos botões de pressão)

